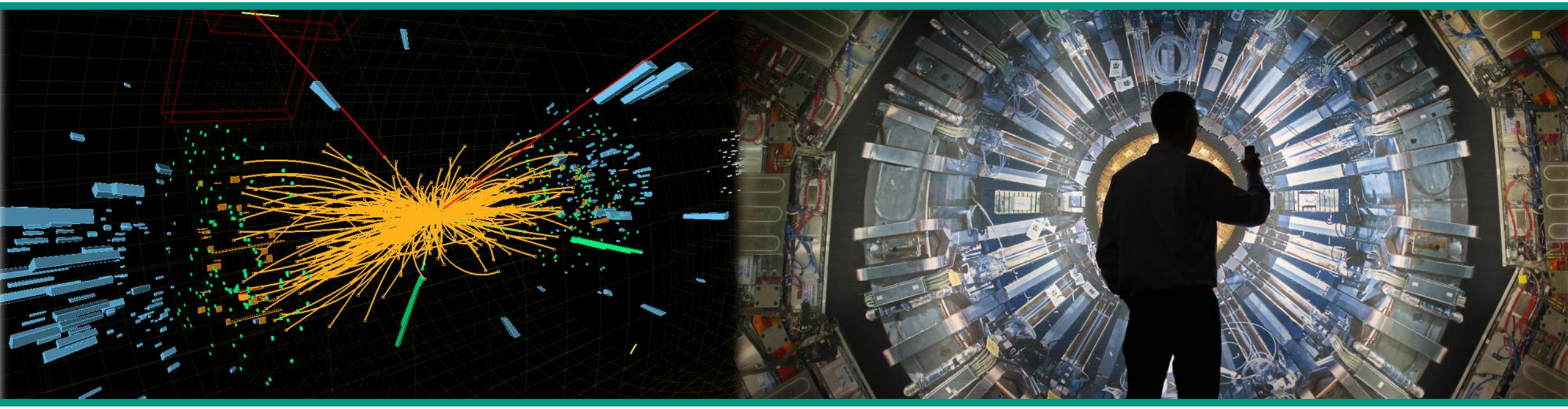
Karlsruhe Institute of Technology

Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 13 13.6.2023



Recap: Verletzung von P

- **Maximale Verletzung der Parität P: Wu & Lederman**

  - $\boldsymbol{Wu}$ – Experiment: Messung der Observable eines **Pseudoskalars**: $\vec{J}_{Kern} \cdot \vec{p}_e$

    Antikorrelation der Impulsrichtung $\vec{p}_e$ des Elektrons
    aus dem $\boldsymbol{\beta}$ – Zerfall von polarisierten $^{60}\boldsymbol{Co}$ – Kernen
    (Vorzugsrichtung: $\vec{p}_e \uparrow\downarrow \vec{J}_{Kern}$)

  - erfordert Durchführung bei $\boldsymbol{mK}$ – Temperaturen (Kontrolle: $\boldsymbol{E2 - \gamma's}$)

  - **maximale Verletzung der Paritätserhaltung** bei schwacher Wechselwirkung

  - Helizität $\boldsymbol{h}$ masseloser Neutrinos: $\bar{\nu} = RH$, $\nu = LH$, gibt es sterile Neutrinos?

  - **Lederman**: Rate von $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ stark bevorzugt gegen $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu$

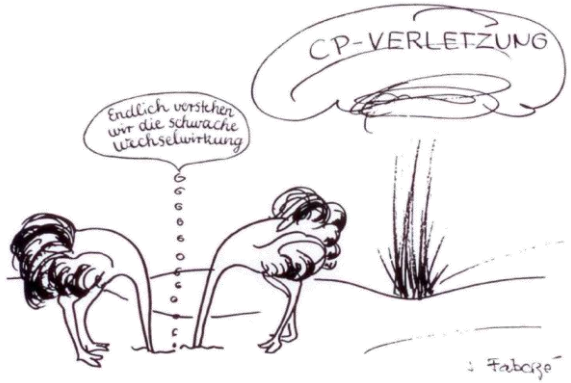
Recap: System der neutralen Kaonen & CP

- $CP-$ **Verletzung im $q\bar{q}$ System der neutralen Kaonen** $|d\bar{s}\rangle$ $|\bar{d}s\rangle$

  - Erzeugung K^0 & $\bar{K}^0$ durch starke Wechselwirkung (Erhaltung von S)

  - **Ladungskonjugation CP**

$$\boxed{CP\,|K^0\rangle = |\bar{K}^0\rangle} \qquad \boxed{CP\,|\bar{K}^0\rangle = |K^0\rangle}$$



K^0 & $\bar{K}^0$ sind ***keine*** CP – Eigenzustände

  - **Propagation**: CP – Eigenzustände K_1 & K_2 mit Eigenwerten $+1$ -1

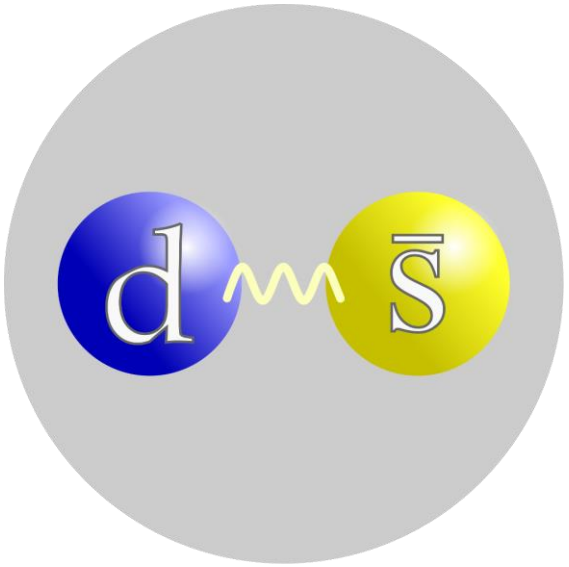
$$\boxed{CP\,|K_1\rangle = +1\,|K_1\rangle} \qquad \boxed{CP\,|K_2\rangle = -1\,|K_2\rangle}$$

Neutrale Kaonen: Effekte bei Propagation

- **Propagation: starke Wechselwirkung erhält CP –Symmetrie & Strangeness**

  - **starke Wechselwirkung** erhält Quantenzahl ´**Strangeness**´ & wir beobachten bisher **keine Verletzung der CP – Symmetrie,** obwohl die QCD* dies erlaubt (weiterer Hinweis auf neue Symmetrie & das **Axion**?)

K^0



Propagation

durch **starke** Ww. erzeugt

wir betrachten nun den Effekt der **schwachen Wechselwirkung** bei der Propagation **im Vakuum** (keine Reaktionen der K^0 mit Materie via QCD!!)

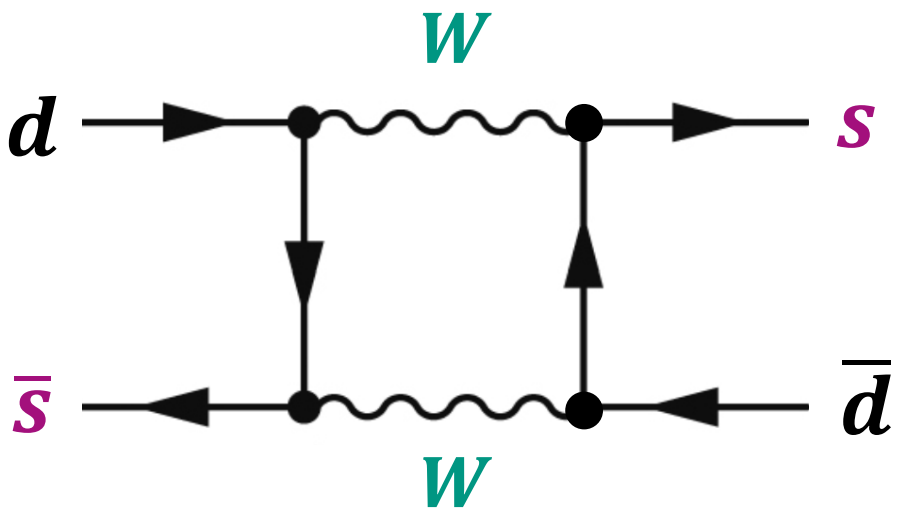
*Quanten-Chromo-Dynamik

Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- **Propagation: schwache Wechselwirkung induziert Kaon-Oszillationen**

  - ein Prozess der schwachen Wechselwirkung in **2. Ordnung**: Austausch von **2 virtuellen W – Bosonen**

K^0



$\overline{K}^0$

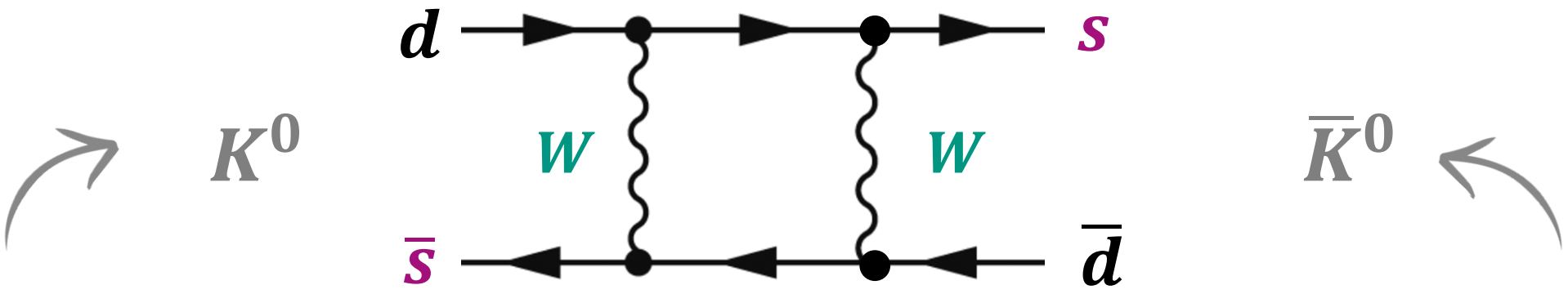
durch **starke** Ww. erzeugt

durch **schwache** Ww. **oszilliert**

Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- **Propagation: schwache Wechselwirkung induziert Kaon-Oszillationen**

  - ein Prozess der schwachen Wechselwirkung in **2. Ordnung**:
  Austausch von **2 virtuellen W – Bosonen**



durch **starke** Ww. erzeugt

durch **schwache** Ww. **oszilliert**

Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- **Neutrale Kaonen: das ´Box-Diagramm´* führt zur Kaon-Mischung $K^0 \Leftrightarrow \bar{K}^0$**

  - ein Prozess der schwachen Wechselwirkung in **2. Ordnung**: **Strangeness-Oszillationen** mit $\Delta S = 2$

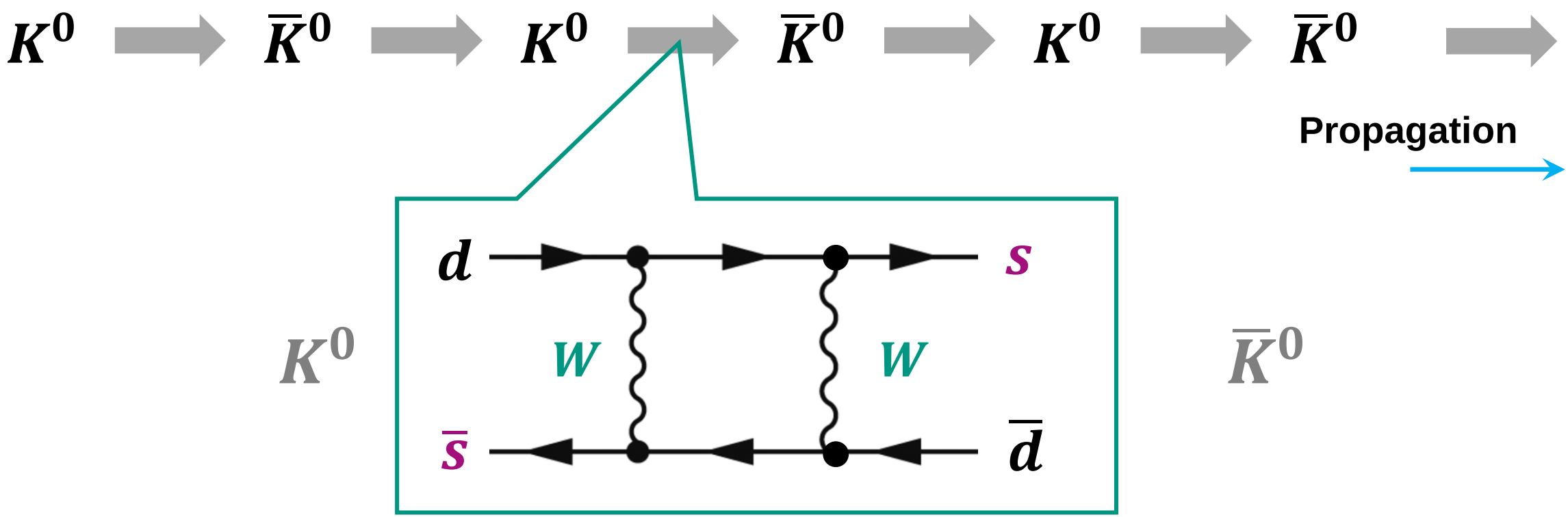
durch **starke** Ww. erzeugt

durch **schwache** Ww. **oszilliert**

*´unboxing´ in Kap. 7.4 Quarkmischung (VL18)

Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- **Strangeness-Oszillationen bei der Ausbreitung neutraler Kaonen**



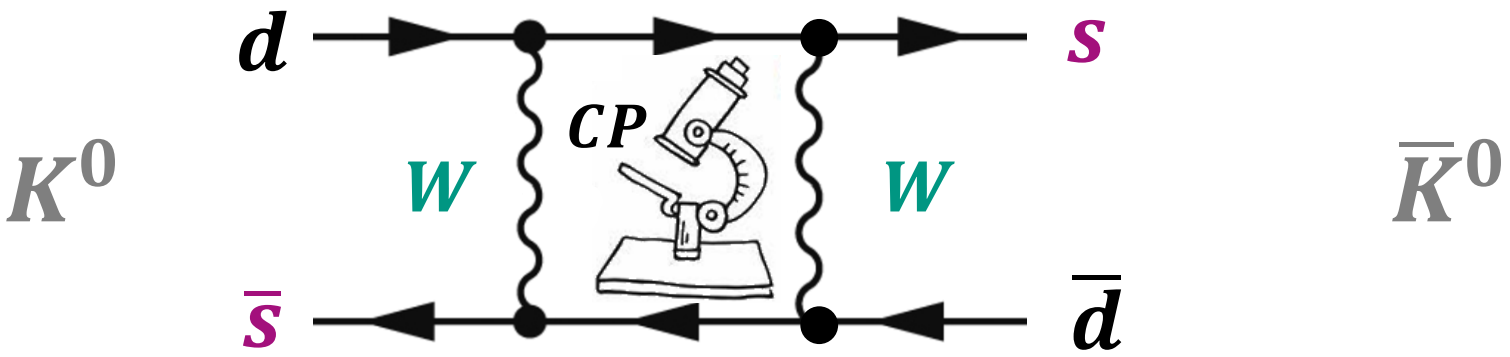
- **Recap**: starke Ww. ist $\boldsymbol{Strangeness}$ – erhaltend, d.h. damit ist $\Gamma_{QCD}(K^0 \to \bar{K}^0) = 0$

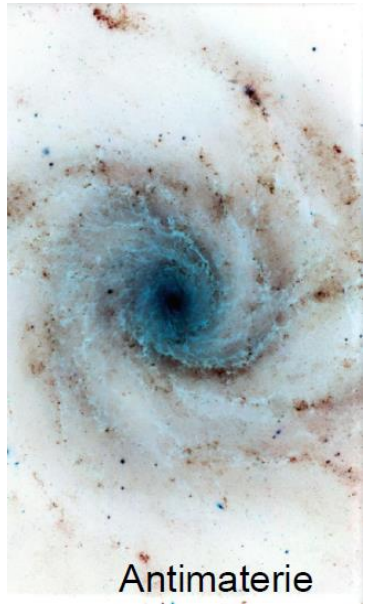
Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- **Wenn CP – Erhaltung verletzt, dann gilt $\Gamma(K^0 \to \bar{K}^0) \neq \Gamma(\bar{K}^0 \to K^0)$**

$$K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow$$

CP – Symmetrie: ist schwache Ww. von Teilchen (K^0) & Antiteilchen ($\bar{K}^0$) identisch ??





- hohe Frequenz der Kaon-Oszillation: $f = 5,3 \cdot 10^9\ s^{-1}$ ⇨ **ideales Labor für CP**

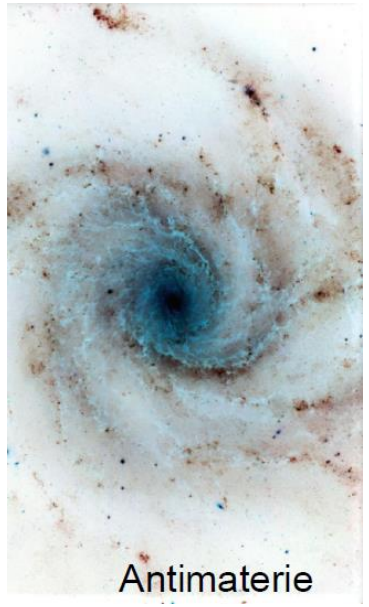
Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- **Wenn CP – Erhaltung verletzt, dann gilt $\Gamma(K^0 \to \bar{K}^0) \neq \Gamma(\bar{K}^0 \to K^0)$**

$$K^0 \Rightarrow \bar{K}^0 \Rightarrow K^0 \Rightarrow \bar{K}^0 \Rightarrow K^0 \Rightarrow \bar{K}^0 \Rightarrow$$

CP – Symmetrie: ist schwache Ww. von Teilchen (K^0) & Antiteilchen ($\bar{K}^0$) identisch ??

K^0 wir nutzen die Oszillation $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ bei der Propagation aus, d.h. wir benötigen keinen Vergleich eines Materiestrahls rel. zum Antimaterie-Strahl wie z.B. bei ν´s $\bar{K}^0$



- hohe Frequenz der Kaon-Oszillation: $f = 5,3 \cdot 10^9\ s^{-1}$ ⇨ **ideales Labor für CP**

Neutrale Kaonen: Mischung bei Propagation

- **Indikator für CP: K^0 & $\bar{K}^0$ mischen zu den CP – Eigenzuständen K_1 & K_2**

$$K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow$$

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle \right)$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle \right)$$

$$CP\,|K_1\rangle = +1\,|K_1\rangle$$

$$CP\,|K_2\rangle = -1\,|K_2\rangle$$

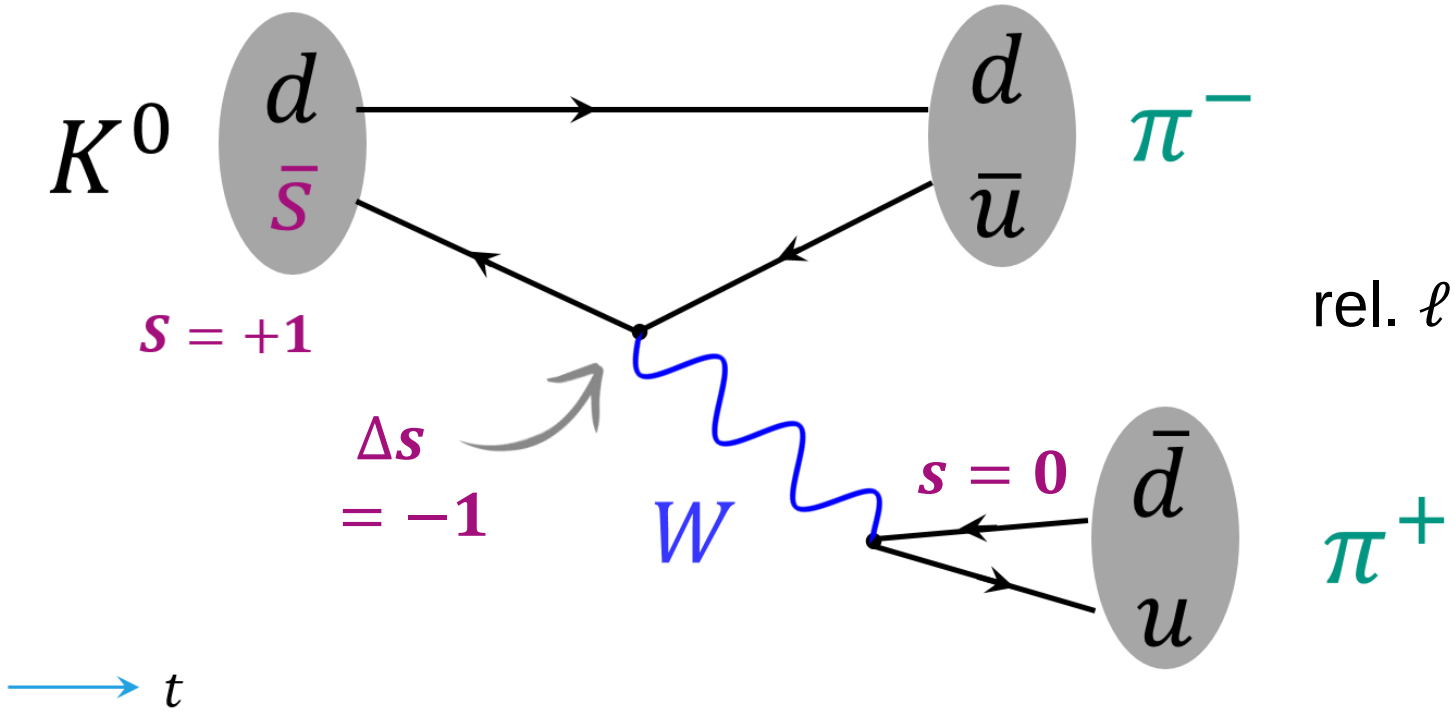
CP – Eigenzustände K_1 & K_2

Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in Pionen

- **Zerfall neutraler Kaonen: Strangeness-Verletzung**

  - Kaonen werden durch Prozesse der **schwachen Wechselwirkung zerfallen: Beispiel 2π – Zerfall**

kein CP – Eigen-Zustand, dies sind K_1 & K_2



rel. $\ell = 0$

⇨ wir müssen daher zunächst CP – Zustände untersuchen

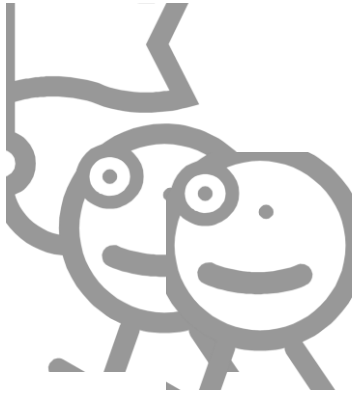
Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in Pionen

- **Zerfall neutraler Kaonen: was ist CP – Symmetrie von $2\,\pi$** bzw. $3\,\pi$ Zerfällen?

  - System K_1 und K_2 mit seinen definierten CP – **Eigenwerten** kann bei einer **perfekten CP – Symmetrie** nur in unterschiedliche Pion-Systeme zerfallen: $2\,\pi$ oder $3\,\pi$ Zerfälle

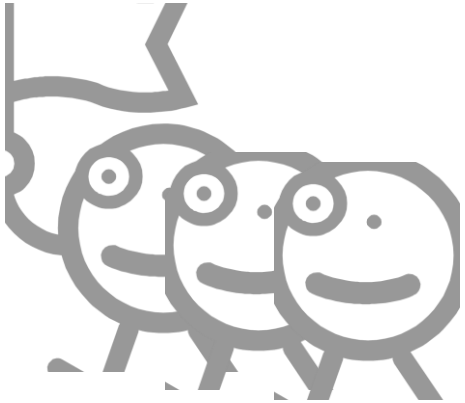
$$\boxed{CP\,|K_1\rangle = +1\,|K_1\rangle}$$

$$\boxed{CP\,|K_2\rangle = -1\,|K_2\rangle}$$



$2\,\pi$

CP – Symmetrie?



$3\,\pi$

Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in 2 Pionen

- CP – **Zustände von 2 Pionen** (π^+, π^-) oder (π^0, π^0) **:** $CP = +1$

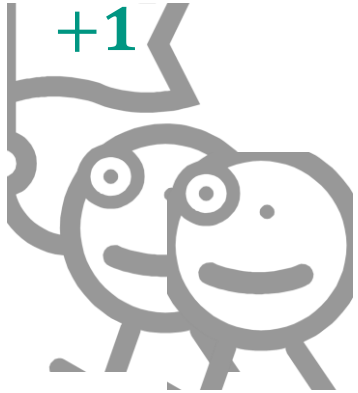
Parität P & C-Parität & CP eines Systems aus 2 **Pionen** mit $\ell = 0$

$$P\,|\pi^+\pi^-\rangle = (-1)^\ell \cdot (-1) \cdot (-1)\,|\pi^+\pi^-\rangle = +1\,|\pi^+\pi^-\rangle$$

$$C\,|\pi^+\pi^-\rangle = +1\,|\pi^+\pi^-\rangle$$

$$CP\,|\pi^+\pi^-\rangle = +1\,|\pi^+\pi^-\rangle$$

$$CP\,|\pi^0\pi^0\rangle = +1\,|\pi^0\pi^0\rangle$$

$CP =$ 

$2\,\pi$

Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in 3 Pionen

- CP – **Zustände von 3 Pionen** (π^+, π^-, π^0) oder (π^0, π^0, π^0) **:** $CP = -1$

Parität P & C-Parität & CP eines Systems aus 3 **Pionen** mit $\ell = 0$

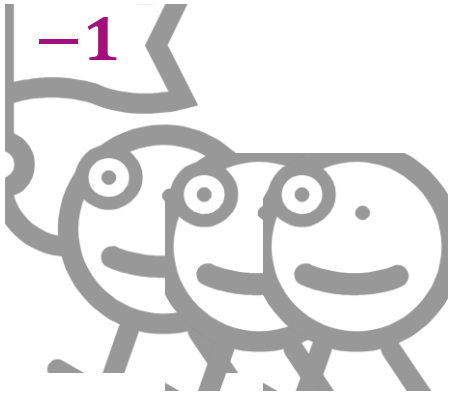
$$P\,|\pi^0\pi^+\pi^-\rangle = (-1)^\ell \cdot (-1) \cdot (-1) \cdot (-1) \cdot |\pi^0\pi^+\pi^-\rangle = -1\,|\pi^0\pi^+\pi^-\rangle$$

$$C\,|\pi^0\pi^+\pi^-\rangle = +1\,|\pi^0\pi^+\pi^-\rangle$$

$$CP\,|\pi^0\pi^+\pi^-\rangle = -1\,|\pi^0\pi^+\pi^-\rangle$$

$$CP\,|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle = -1\,|\pi^0\pi^0\pi^0\rangle$$

$CP =$



$3\,\pi$

Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in Pionen

- **System der oszillierenden Kaonen: wir betrachten nun Zerfallsprozesse**

  - die Kaon-Zerfälle in $\mathbf{2}$ bzw. $\mathbf{3}$ Pionen unterscheiden sich nun durch ihre **Lebensdauer** $\boldsymbol{\tau}$: wir benennen daher diese Zerfalls-Zustände mit $\boldsymbol{K_S}$ bzw. $\boldsymbol{K_L}$

  - Kaonzerfall ($\boldsymbol{M = 497,6\ MeV}$) in $\mathbf{2}$ **Pionen**: $\mathbf{2}\ \boldsymbol{\pi^0}$ ($\boldsymbol{M_{ges} = 2 \times 135\ MeV}$):
    ⇨ großer **Phasenraum*** für die Pion-Impulse: ⇨ **kurzes** $\boldsymbol{\tau}$ ($\boldsymbol{8.9 \cdot 10^{-11} s}$)

    kurzlebiger Kaon-Zustand $\boldsymbol{K_S}$

K_S

  - Kaonzerfall ($\boldsymbol{M = 497,6\ MeV}$) in $\mathbf{3}$ **Pionen**: $\mathbf{3}\ \boldsymbol{\pi^0}$ ($\boldsymbol{M_{ges} = 3 \times 135\ MeV}$):
    ⇨ kleiner **Phasenraum*** für die Pion-Impulse: ⇨ **langes** $\boldsymbol{\tau}$ ($\boldsymbol{5.2 \cdot 10^{-8} s}$)

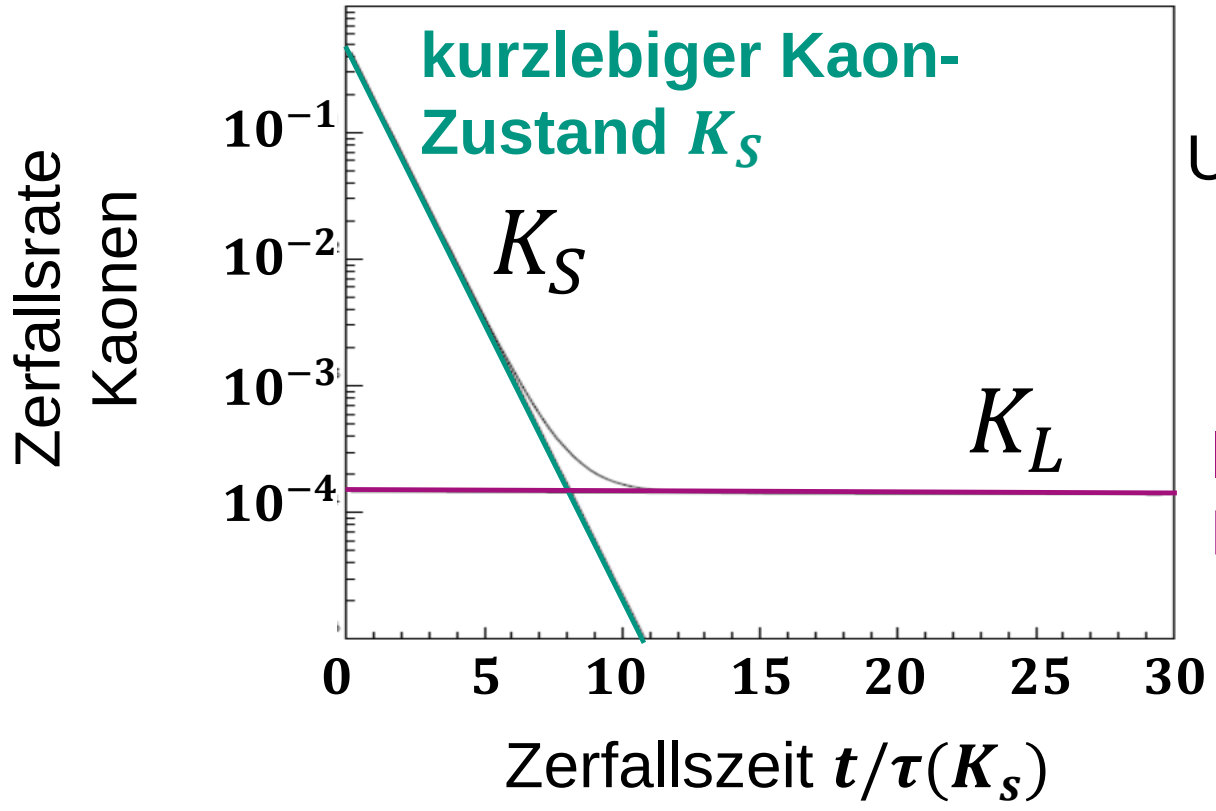
    langlebiger Kaon-Zustand $\boldsymbol{K_L}$

K_L

*s. Fermi´s Goldene Regel (VL 9, S. 31-37)

Neutrale Kaonen: Zerfallsprozesse in Pionen

- **System der oszillierenden Kaonen: Zeitdauer der Zerfallsprozesse**



Unterschied: Faktor ~ 600

langlebiger Kaon-Zustand K_L

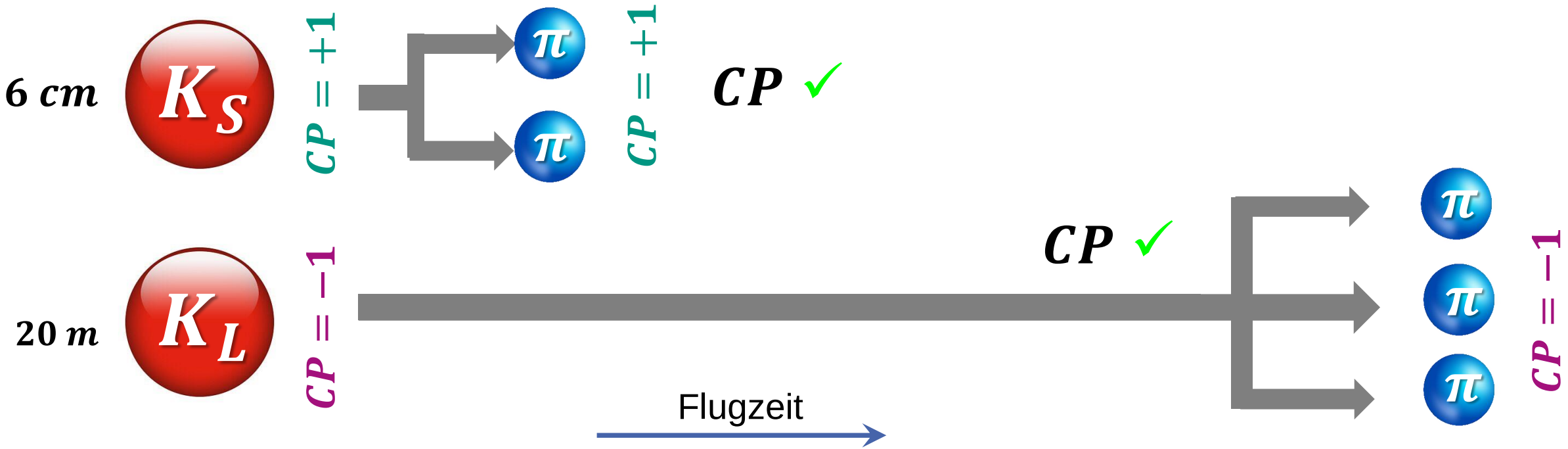
- über die Flug-zeit t (-strecke) der Kaonen lassen sich K_S von K_L trennen

Trennung der Zerfälle von K_S von K_L

- **Trennung von kurzlebigen und langlebigen Kaonen über Flugzeit**

  - bisher: perfekte CP –Symmetrie beim Zerfall von neutralen Kaonen

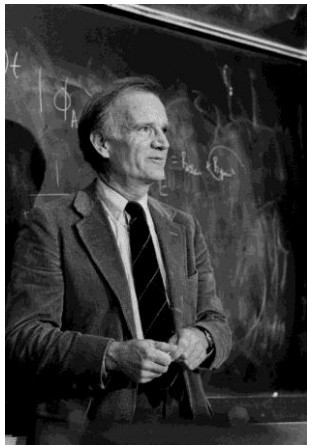
  - Test CP –Symmetrie: untersuche Zerfall des K_L in Pionen (bestimme # der π)



Kaon-Zerfälle: Suche nach CP – Verletzung

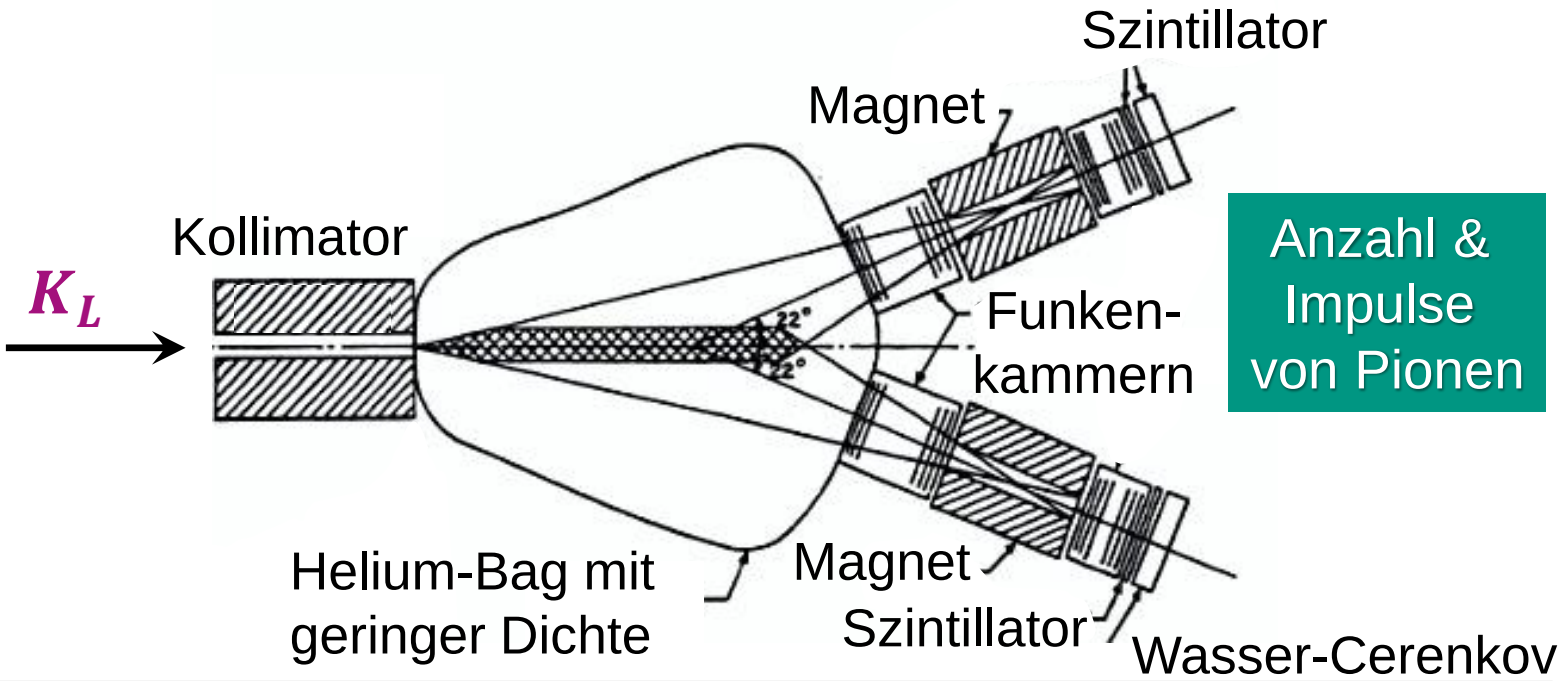
- ***Cronin & Fitch*** **untersuchen CP – Symmetrie im System neutraler Kaonen am AGS*-Beschleuniger am BNL (Brookhaven National Laboratory) 1964**
  - Beobachtung: dominanter Zerfallsmodus $K_L \rightarrow 3\,\pi$ mit $CP = -1$ ☑
  - Suche nach kleinem Anteil von möglichem CP – verletzenden Zerfällen $K_L \rightarrow 2\,\pi$ mit $CP = +1$ (💣)

James Cronin



Val Fitch

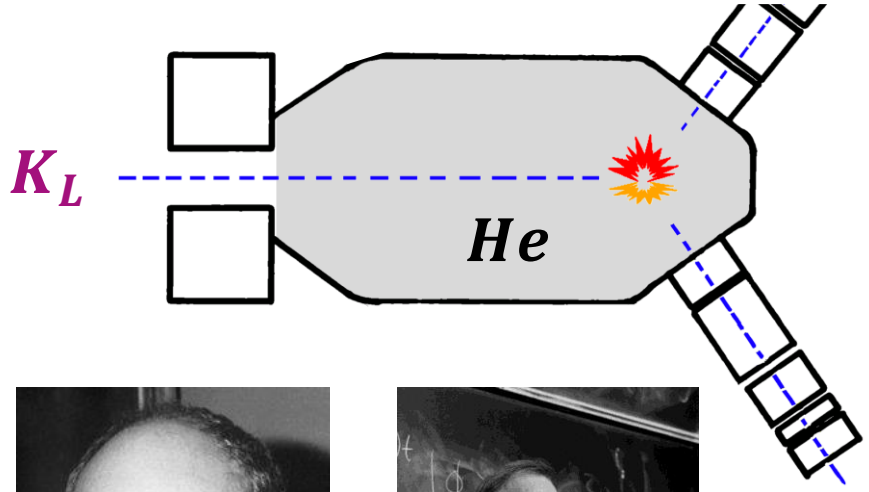
Q: nobelprize, American IoP



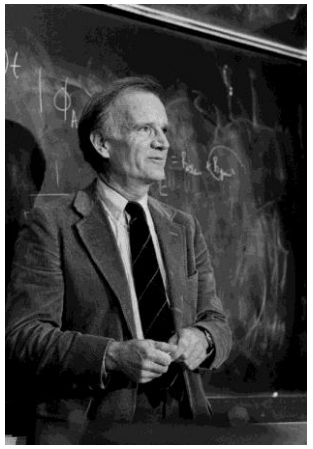
*Alternating Gradient Synchrotron

CP – Verletzung bei neutralen Kaonen, nachgefragt

- **Wieso haben wir den K_L Strahl in eine He – Kammer mit geringer Dichte geleitet?**



James Cronin



Val Fitch

Q: nobelprize,

A) weil Kaonen K_L in Materie über Stöße **abgelenkt** werden und so die komplexe Rekonstruktion erschweren ✗

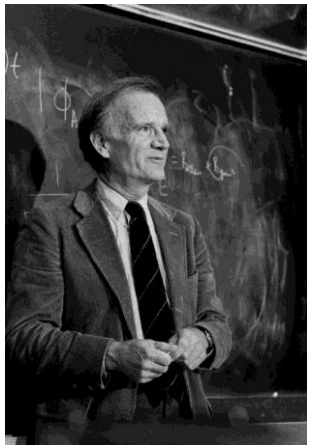
B) weil die Pionen aus den Zerfällen der Kaonen K_L in Materie **eingefangen** werden ✗

C) weil Kaonen K_L in Materie **regenerieren**, d.h. über die starke Wechselwirkungen wieder K^0 und $\bar{K}^0$ erzeugt werden ✓

Kaon-Zerfälle: Suche nach CP – Verletzung

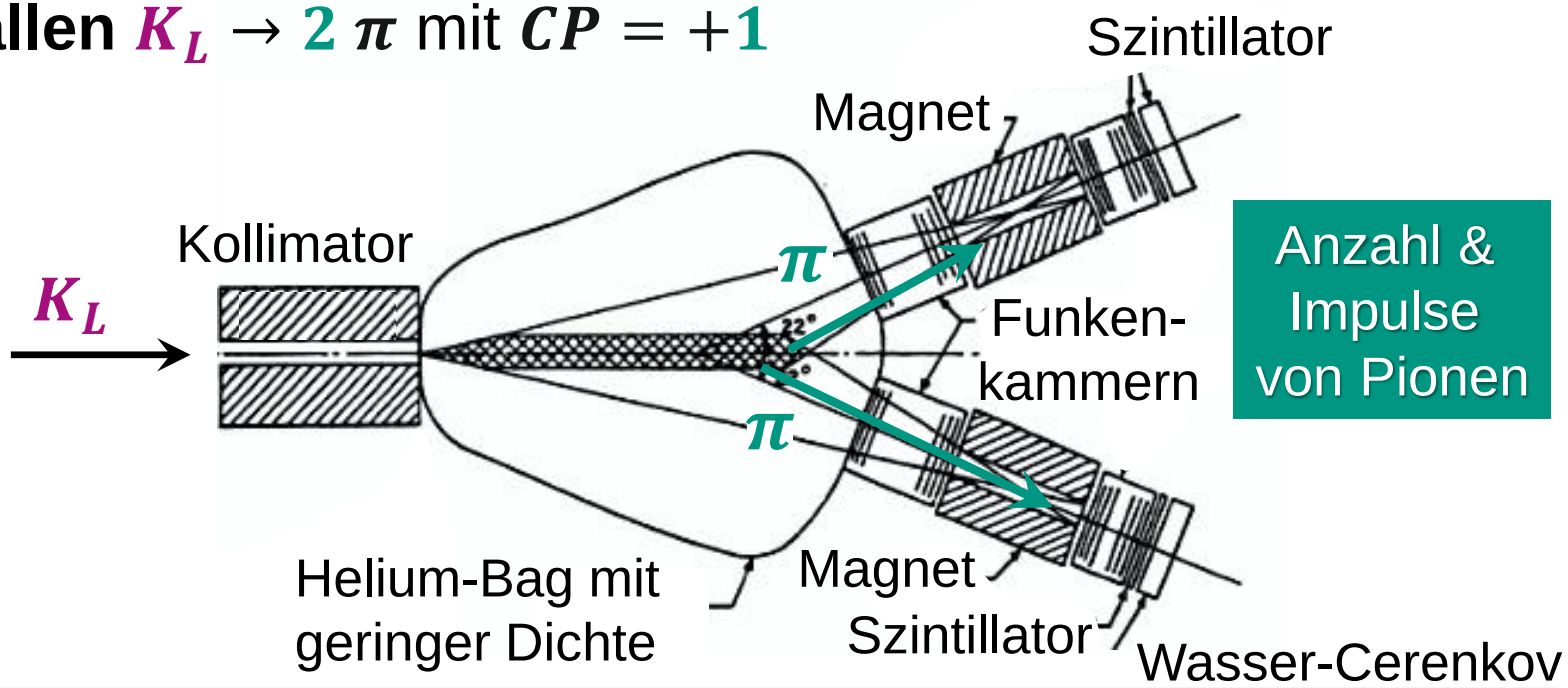
- ***Cronin & Fitch* beobachten erstmals eine kleine Verletzung der CP – Symmetrie im System neutraler Kaonen**
  - Beobachtung: dominanter Zerfallsmodus $K_L \to 3\,\pi$ mit $CP = -1$
  - Beobachtung eines kleinen Anteils mit $R = (2,3 \pm 0,4) \times 10^{-3}$ an CP – **verletzenden Zerfällen** $K_L \to 2\,\pi$ mit $CP = +1$

James Cronin



Val Fitch

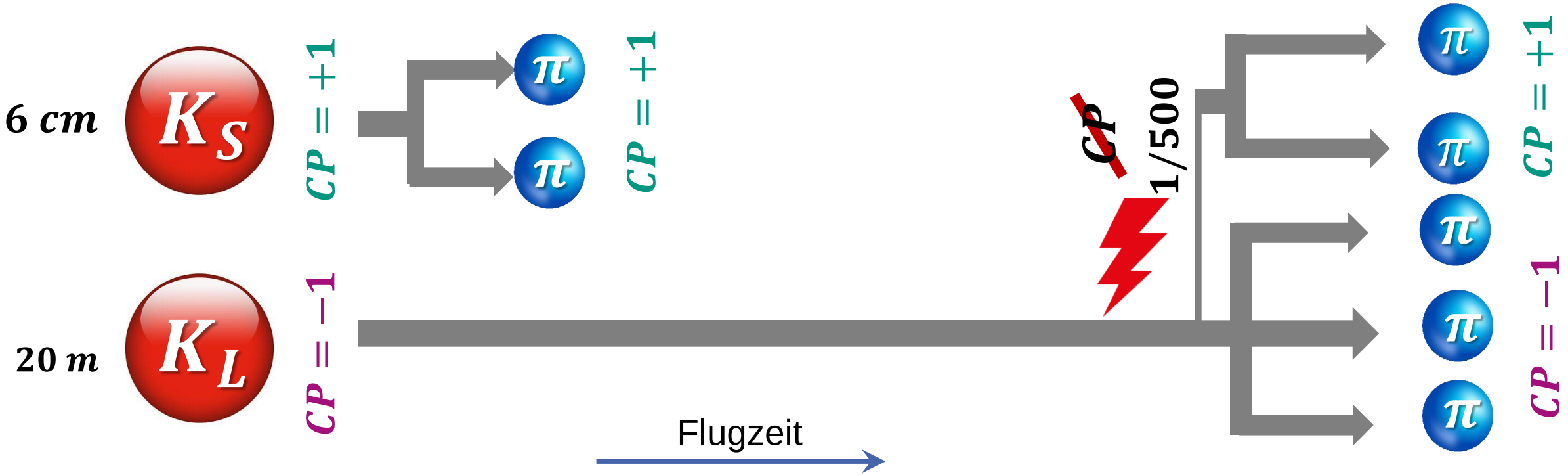
Q: nobelprize, American IoP



Trennung der Zerfälle von K_S von K_L

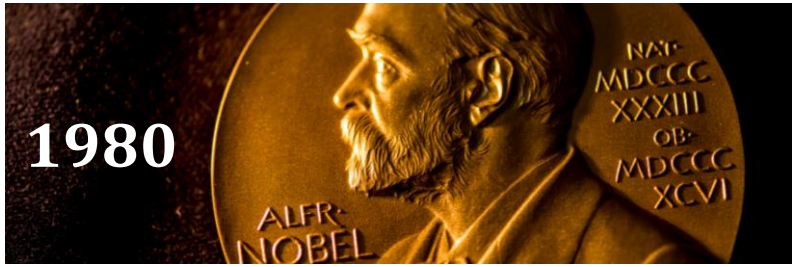
- **Langlebiger Kaon-Zustand K_L zeigt kleine Verletzung der CP – Symmetrie**

  - CP – Symmetrie ist beim Zerfall von neutralen Kaonen verletzt !!
  - ein kleiner Teil der K_L zerfällt in 2 **Pionen**: $K_L \rightarrow 2\,\pi$ mit $CP = +1$



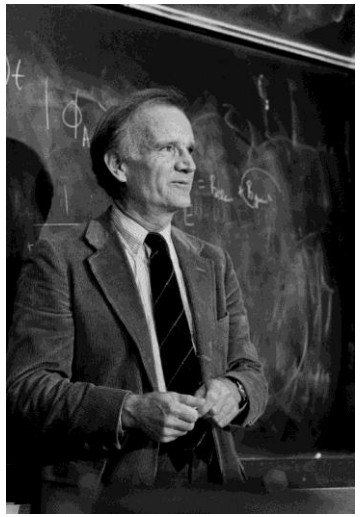
CP – Verletzung im System der neutralen Kaonen

- CP – Verletzung bei den Kaonen ist ein sehr kleiner Effekt: kann nicht die beobachtete Baryonen-Asymmetrie im Universum erklären



*" for the discovery of **violations of fundamental symmetry principles** in the decay of **neutral K-mesons**."*

James Cronin



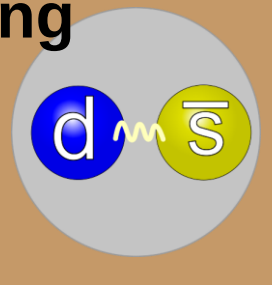
Val Fitch

Q: nobelprize, American IoP, symmetry magazine

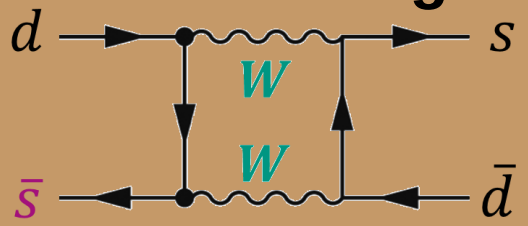
Recap: Effekte bei Propagation neutraler Teilchen

Starke Wechselwirkung

$|\bar{d}s\rangle\ |d\bar{s}\rangle$



Schwache Wechselwirkung



neutrale Kaonen

$\bar{K}^0, K^0$

$K^0 \Leftrightarrow \bar{K}^0$

- **Erzeugung** von $K^0, \bar{K}^0$
- Strangeness wird erhalten $\Delta S = 0$
- ermöglicht Wechselwirkung mit Materie: Regenerationseffekte

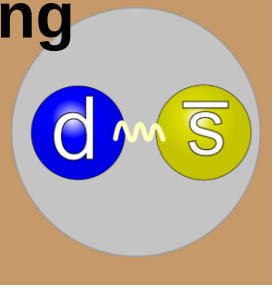
- **Propagation** mit $K^0 \Leftrightarrow \bar{K}^0$ **Strangeness-Oszillationen**
- Strangeness wird verletzt $\Delta S = 2$ (Boxdiagramm)

Q: symmetry magazine

Recap: Effekte bei Propagation neutraler Teilchen

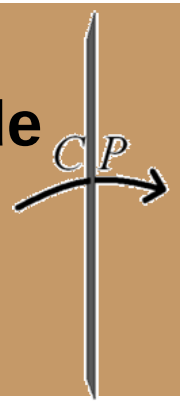
Starke Wechselwirkung

$|\bar{d}s\rangle\ |d\bar{s}\rangle$



neutrale Kaonen

***CP*-Eigenzustände**



$\bar{K}^0, K^0$

K_1, K_2

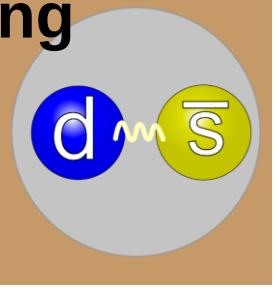
- **Erzeugung** von $K^0, \bar{K}^0$
- Strangeness wird erhalten $\Delta S = 0$
- ermöglicht Wechselwirkung mit Materie: Regenerationseffekte

- **Mischung von K^0 und $\bar{K}^0$ zu CP – Eigenzuständen K_1 & K_2**
- K_1 & K_2: keine Wechselwirkungs-Eigenzustände (starke, schwache)

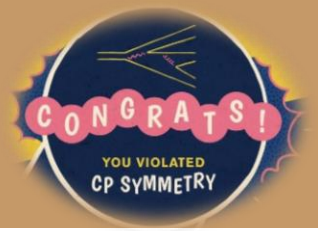
Recap: Effekte bei Propagation neutraler Teilchen

Starke Wechselwirkung

$|\bar{d}s\rangle\ |d\bar{s}\rangle$



Schwache Wechselwirkung



neutrale Kaonen

$\bar{K}^0, K^0$

K_L, K_S

- **Erzeugung** von $K^0, \bar{K}^0$
- Strangeness wird erhalten $\Delta S = 0$
- ermöglicht Wechselwirkung mit Materie: Regenerationseffekte

- seltener Zerfall von K_L in $2\ \pi$

CP – Erhaltung wird verletzt!

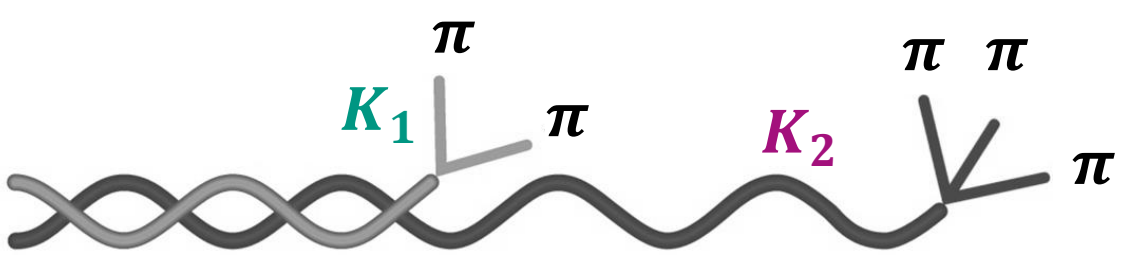
Ursache der CP – Verletzung

- **Indirekte CP –Verletzung über die Mischung von Kaonen**

- CP – Erhaltung:

Zustände mischen nicht

$K_S = K_1 \quad K_L = K_2$



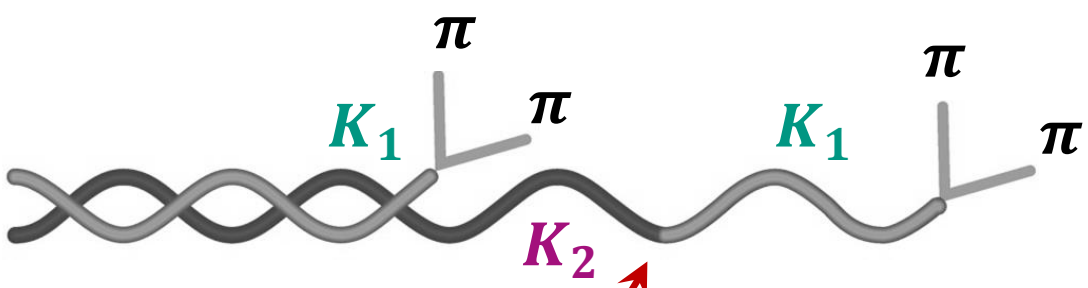
- ´indirekte´ CP – Verletzung (dominant):

Zustände **mischen**

$K_S \neq K_1 \quad K_L \neq K_2$

da Oszillationsraten nicht gleich

$\Gamma(K^0 \to \bar{K}^0) \neq \Gamma(\bar{K}^0 \to K^0)$



indirekte CP-Verletzung

Q: LANL

Ursache der CP – Verletzung

- **Indirekte CP –Verletzung: K_s & K_L aus Mischung von Zuständen K_1 und K_2**

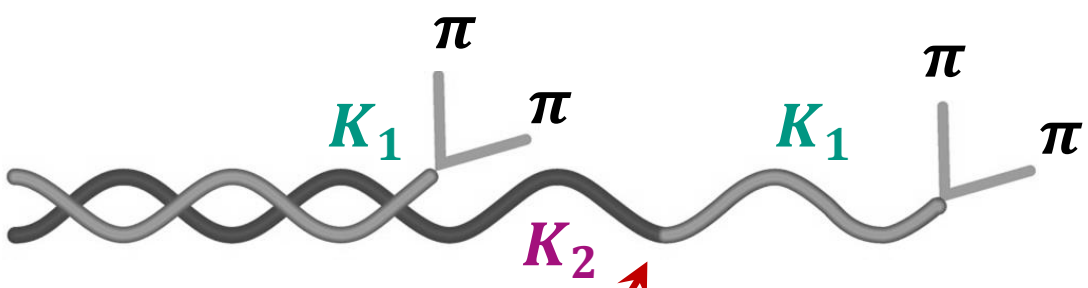
$$|K_s\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}} \cdot \left(|K_1\rangle + \varepsilon \cdot |K_2\rangle \right) \quad |K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\varepsilon|^2}} \cdot \left(\overset{= 2{,}23 \times 10^{-3}}{\varepsilon} \cdot |K_1\rangle + |K_2\rangle \right)$$

- ´indirekte´ CP – Erhaltung (dominant):

Zustände **mischen**

$K_S \neq K_1 \quad K_L \neq K_2$

K_L enthält eine **kleine Beimischung** von K_1 als Ursache des Effekts



indirekte CP-Verletzung

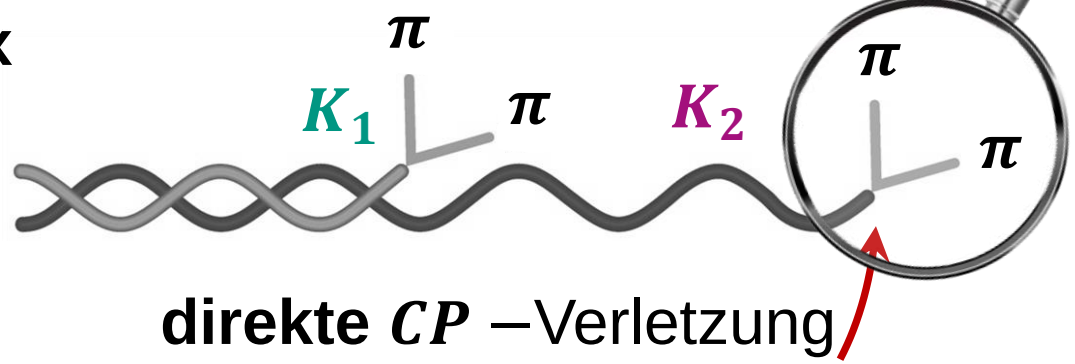
Q: LANL

zwei Arten von CP – Verletzung: … und direkt

- **direkte CP – Verletzung am Zerfalls-Vertex**

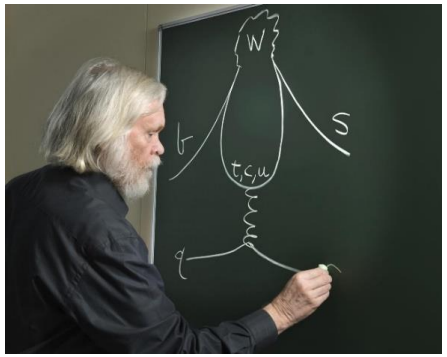
  - die CP – Verletzung erfolgt in diesem Falle **direkt am Zerfallsvertex** $K_2 \to 2\,\pi$

  - die **direkte CP** – Verletzung ist nochmals wesentlich schwächer ($\sim 10^{-6}$) als die **indirekte CP** – Verletzung ($\sim 10^{-3}$) durch die Kaon–Oszillationen $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$

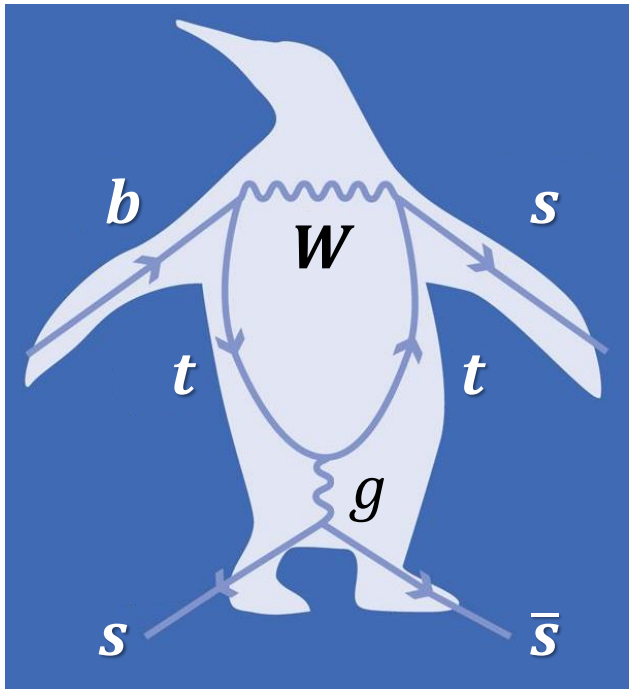


direkte CP –Verletzung

$\varepsilon' \sim 10^{-6}$



´elektroschwacher Pinguin´ von *John Ellis* ($CERN$)*



Q: CERNcourier, LANL

*s. Master- VL: ´Flavour-Physik´

Recap: Kaonzustände und CP

Erzeugung:
starke Wechselwirkung

Erhaltung der Strangeness S
definierte Massenzustände

K^0 $\overline{K}^0$

Propagation

Mischung:
schwache Wechselwirkung

Strangeness-Oszillationen $\Delta S = 2$
via Boxdiagramme

$K^0 \Leftrightarrow \overline{K}^0$

Zerfall:
schwache Wechselwirkung

2 Pionen $CP = +1$ ← K_S

3 Pionen $CP = -1$ ← K_L

CP – Symmetrie:
Eigenzustände von CP

K_1 $CP = +1$

K_2 $CP = -1$

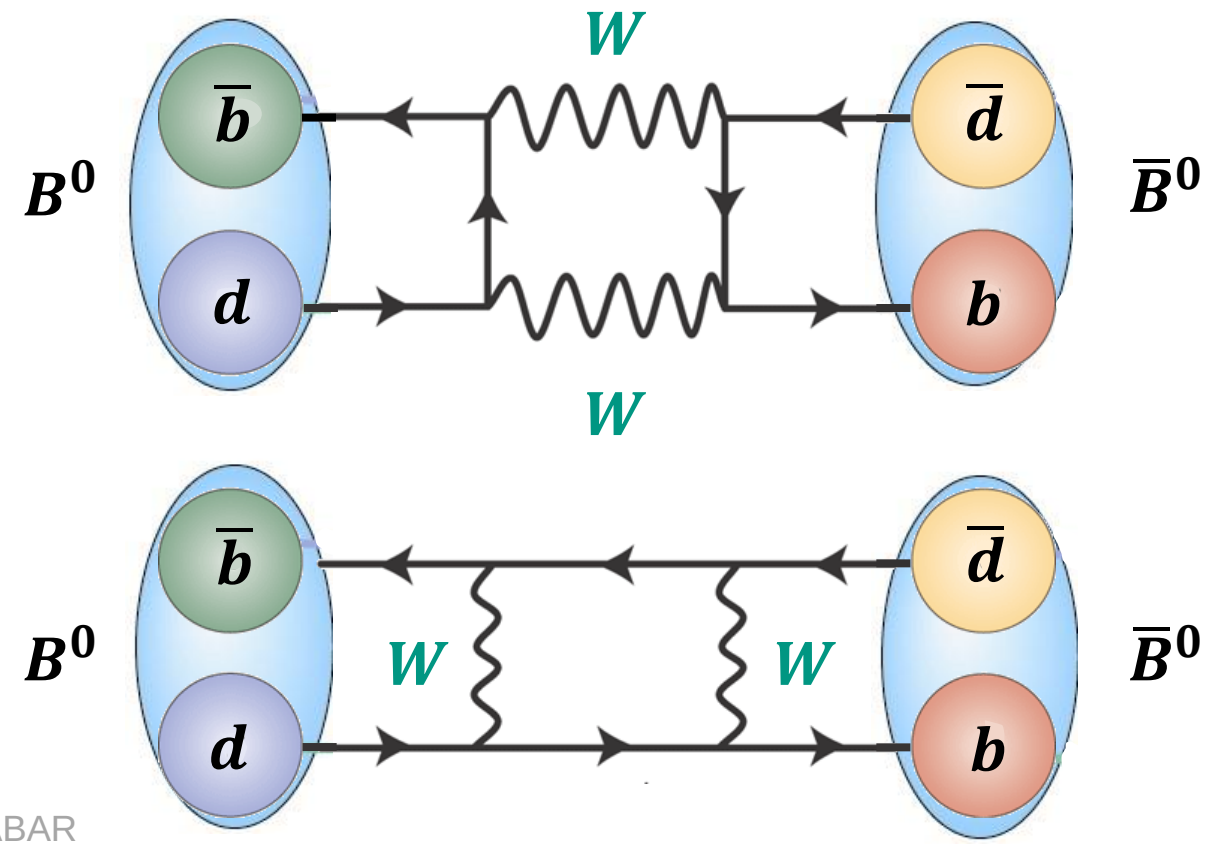
CP – Invarianz

Oszillation von B^0 – Mesonen

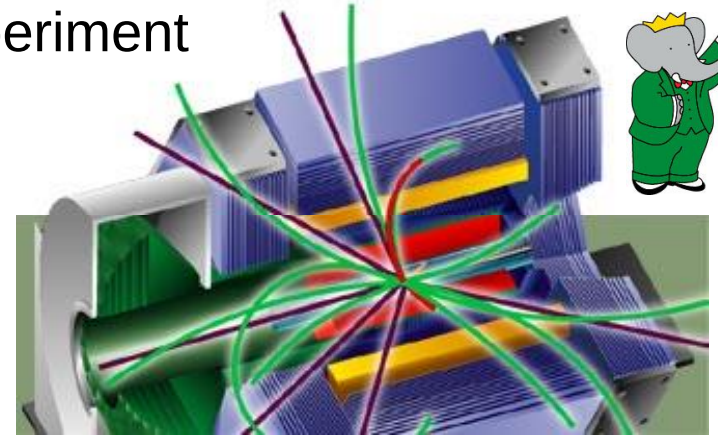
- **Beobachtung im System der neutralen B^0 – Mesonen***

  - die gleichen Effekte wie im K^0 – System beobachtet man auch im B^0 – System an sog. B – **Fabriken** (z.B. $SLAC$)

  - die **CP – verletzenden Effekte im B^0 – System sind wesentlich größer**



$SLAC$: $BaBar$-Experiment



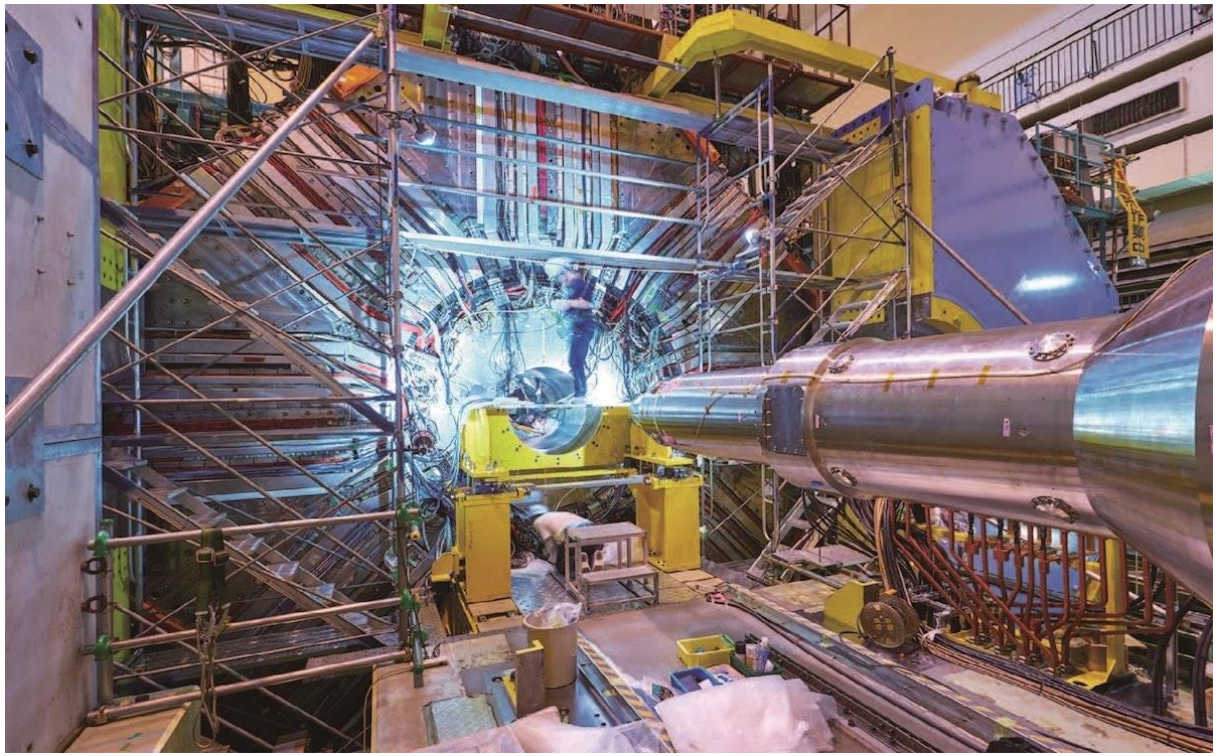
Q: quantumdiaries, BABAR

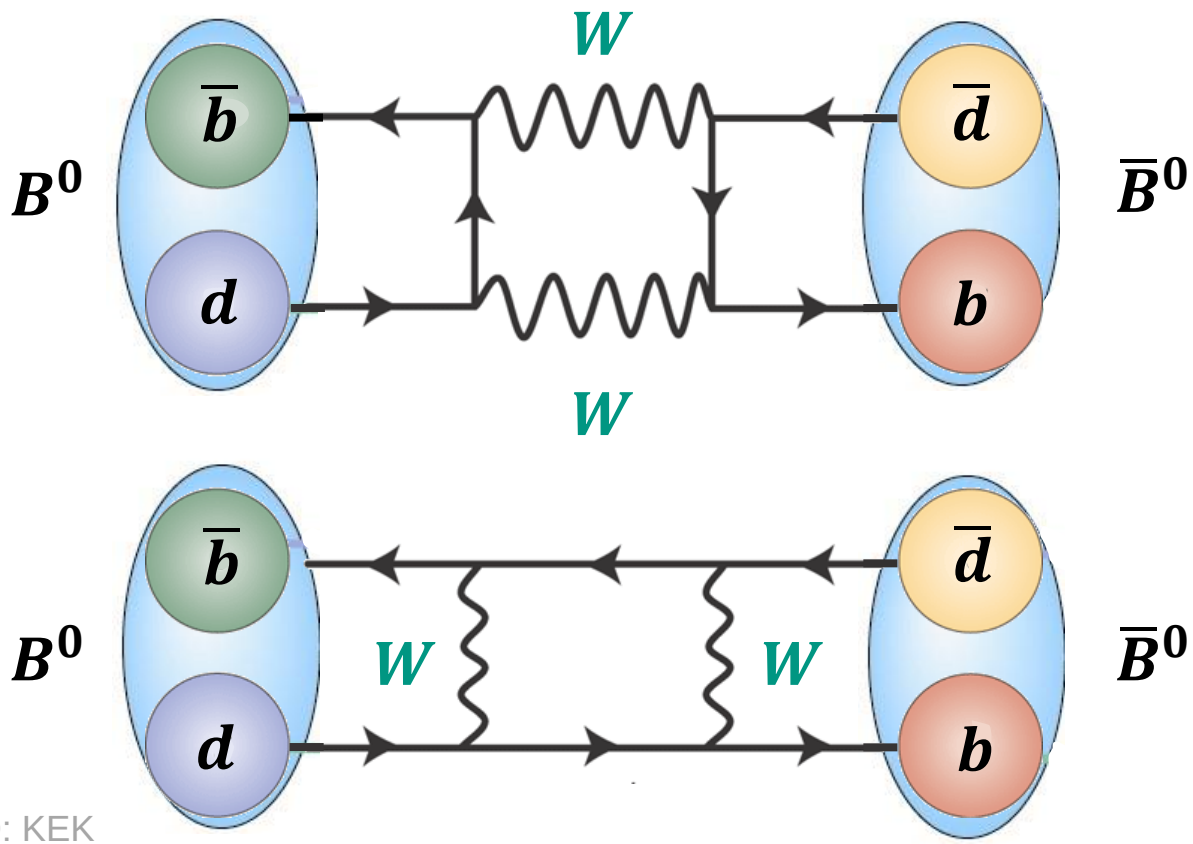
*enthält bottom-Quarks b bzw. Antiquarks $\bar{b}$

Oszillation von B^0 – Mesonen*

- **Beobachtung im System der neutralen B^0 – Mesonen**

  - die gleichen Effekte wie im K^0 – System beobachtet man auch im B^0 – System an sog. B – **Fabriken** (z.B. $KEK - B$)





Q: KEK

CPT – Theorem

- **Invarianz von CPT: physikalische Gesetze bleiben unverändert bei einer kombinierten CPT – Transformation**

  - aufgestellt $\mathbf{1954/55}$ von Wolfgang Pauli, Gerhart Lüders (& John Bell)

  - CPT – Theorem Grundlage der **Quantenfeldtheorien**

  - Voraussetzungen für **CPT – Invarianz**:

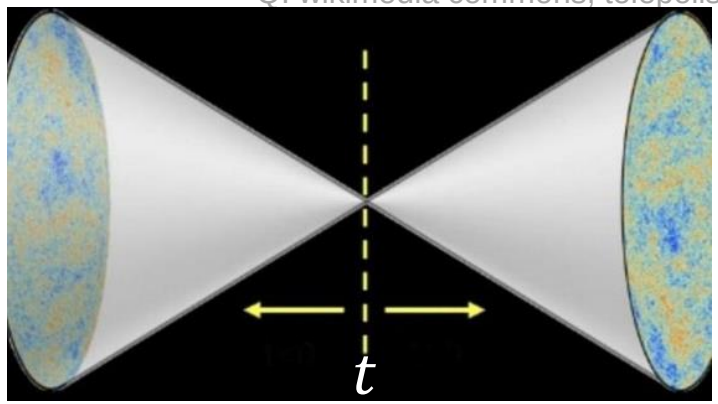
    - Gültigkeit der Lorentz-Invarianz

    - Kausalität & Lokalität

    - Existenz eines quantenmechanischen Vakuums

    ⇨ aktuelle Tests von CPT – Invarianz via System $K^0, \bar{K}^0$

Q: wikimedia commons, telepolis

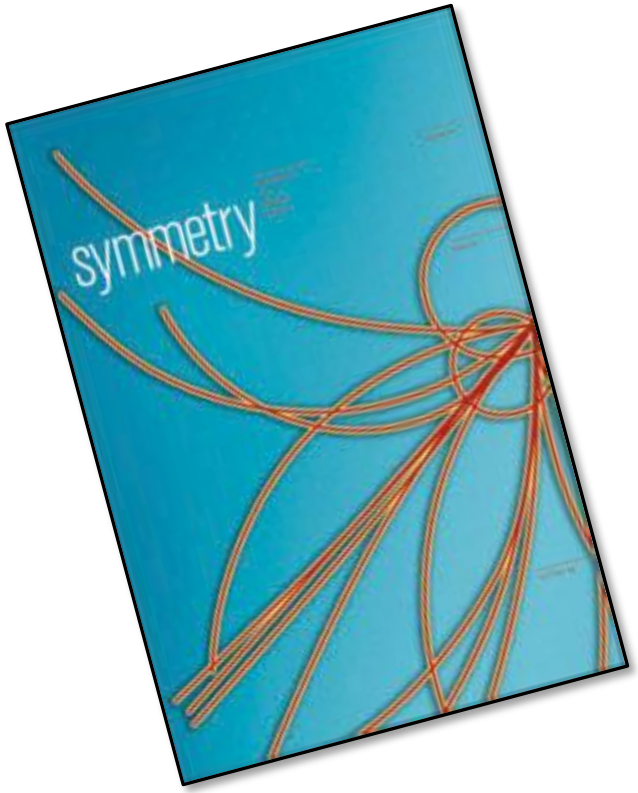


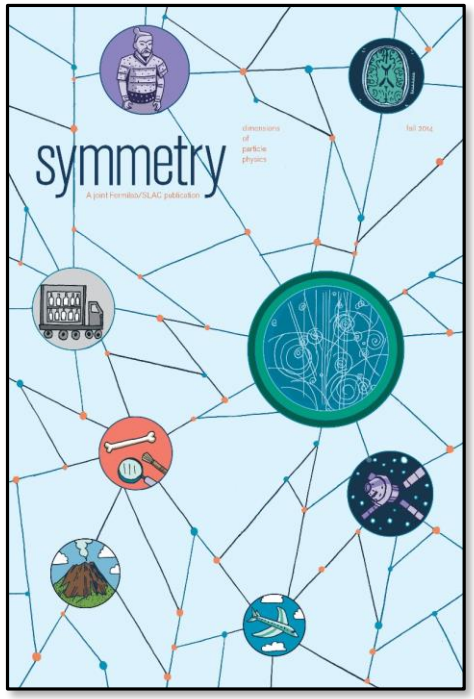
CPT - Invarianz

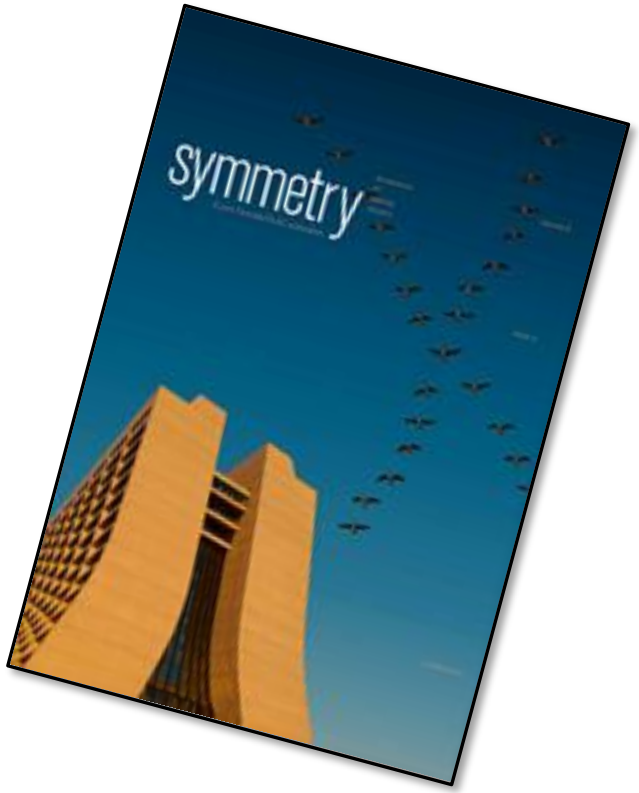
Wolfgang Pauli

Symmetrien in der Teilchenphysik

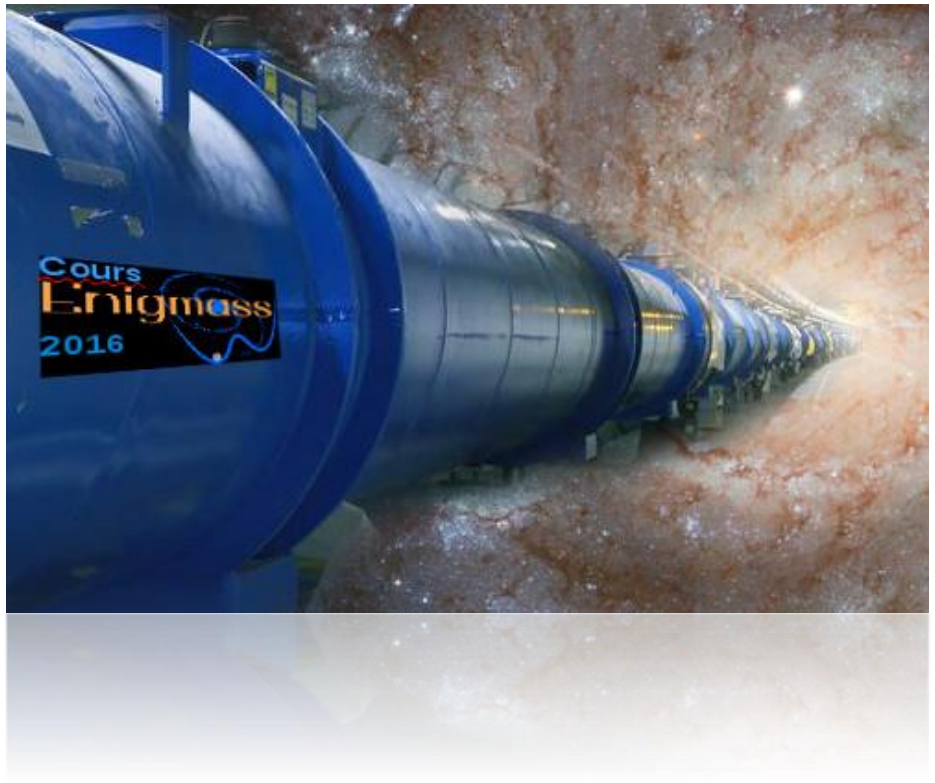
- **David Gross: ´Physics is more or less the study of symmetries´**







symmetry magazine | dimensions of particle physics

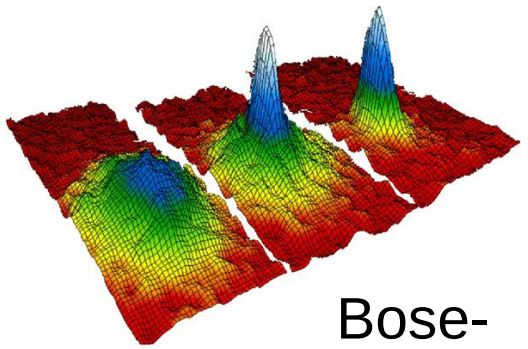


KAPITEL 5.4: SUPERSYMMETRIE

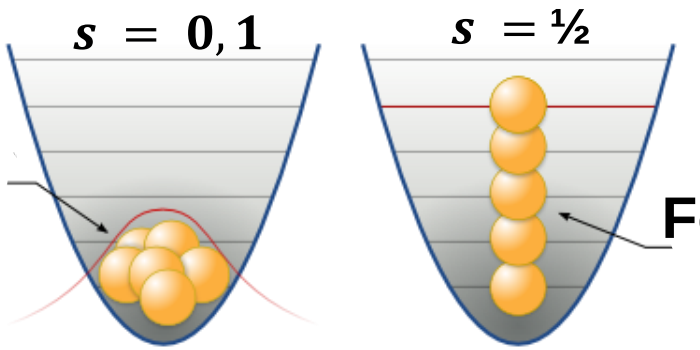
Q: welt der Physik, CERN, KIT

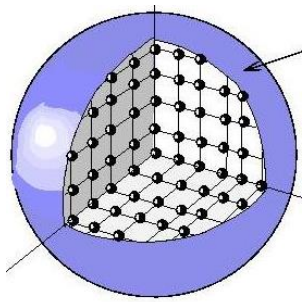
Supersymmetrie ($SUSY$)

- **Theorie jenseits des Standardmodells (SM): Umwandlung / Symmetrie von Bosonen ⇔ Fermionen**



Bose-Kondensat



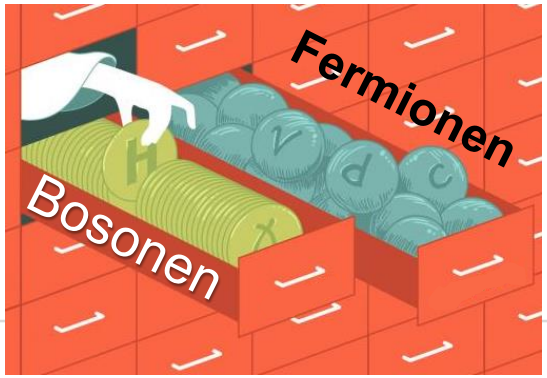


Pauli´sches Ausschluss-Prinzip

Spin-Statistik Theorem

symmetrisch antisymmetrisch

bei Austausch von **2** Teilchen



$Q\,|Boson\rangle = |Fermion\rangle$

Q: $SUSY$ – Operator

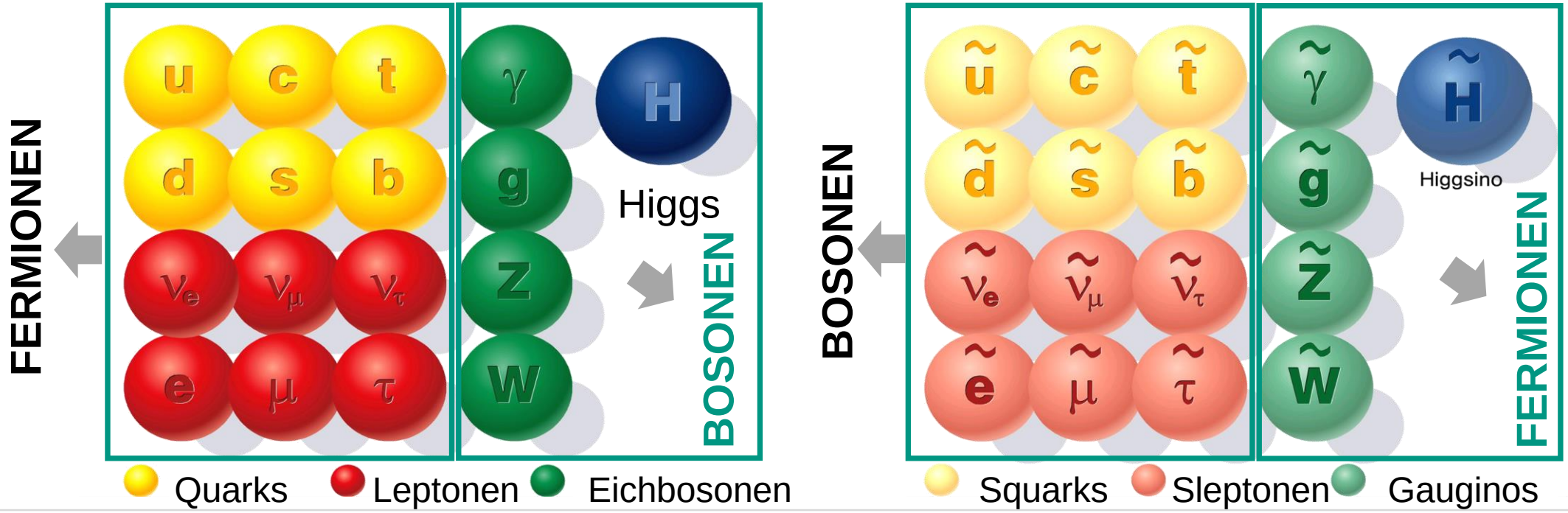
$Q\,|Fermion\rangle = |Boson\rangle$

Q: $SUSY$ – Operator

Q: quantum bits

Supersymmetrie: Teilchenspektrum

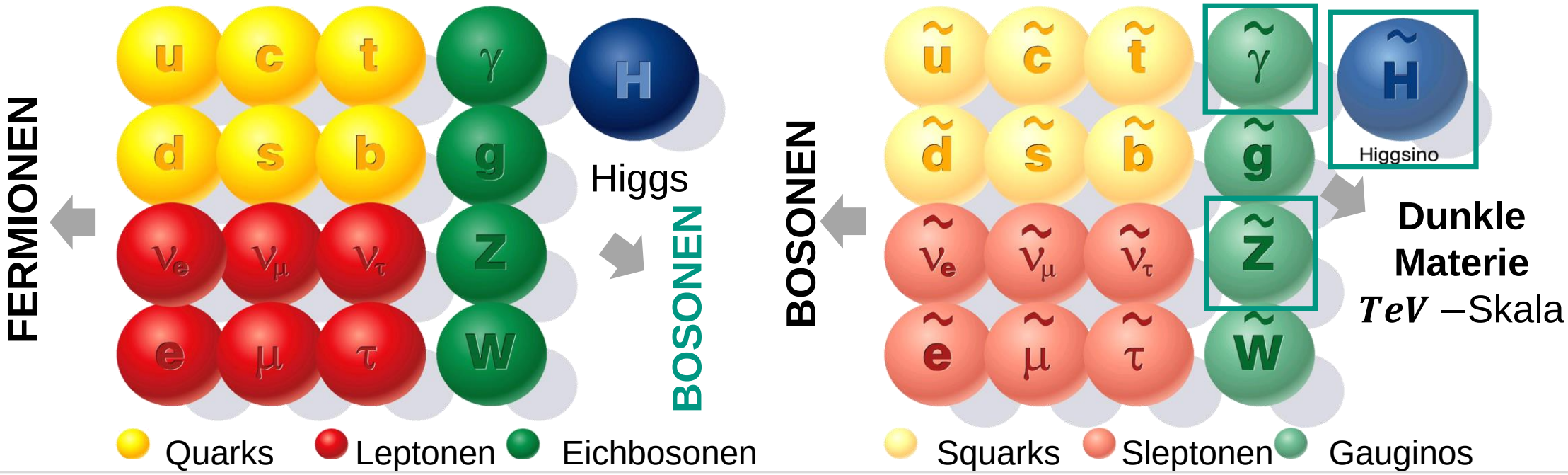
- $SUSY$: **Aufstellung der ersten supersymmetrischen Quantenfeldtheorie durch J. Wess (KIT) & B. Zumino (1973)**
  - Teilchen im SM erhalten (schwere) supersymmetrische ´**Superpartner**´
  - Supersymmetrie wird (auf einer unbekannten Energieskala) gebrochen



Q: welt der physik

Supersymmetrie: riesiger Parameterraum

- $SUSY$: **alle Wechselwirkungen ´treffen´ sich bei einer Energieskala* (*Grand Unified Theories*, *GUT*s)**
  - aber: **minimales $SUSY$ – Modell** mit **105** neuen (unbekannten) physikalischen Parametern!

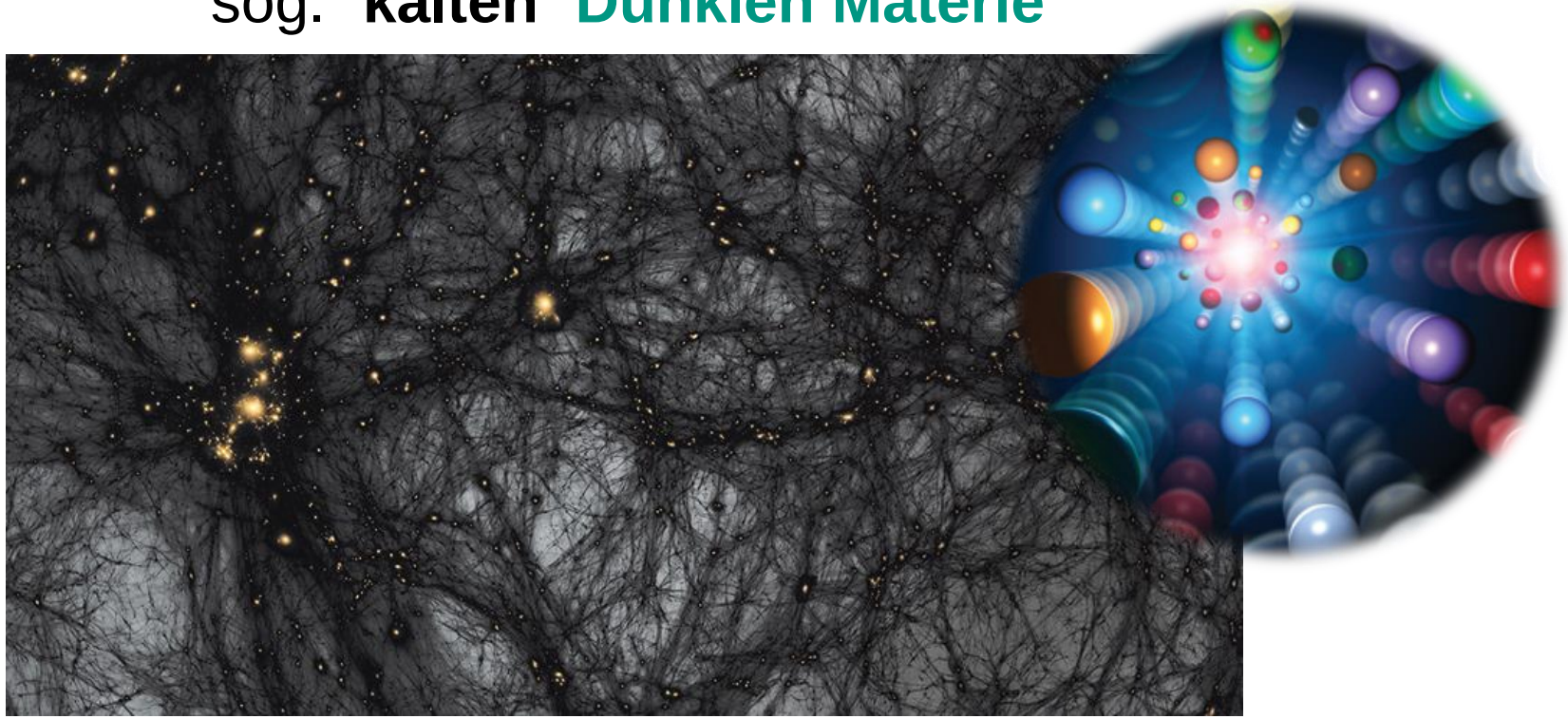


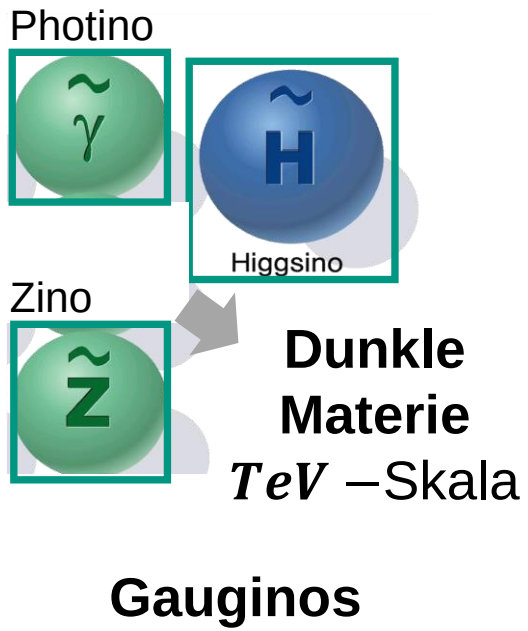
Q: welt der physik

*s. VL10 S. 55/56

Supersymmetrie & Dunkle Materie

- **hypothetische Theorie jenseits des Standardmodells (SM): eine mögliche Erklärung für die kalte Dunkle Materie im Universum***
  - **SUSY** liefert eine ´natürliche´ Erklärung für die Produktion der sog. ´**kalten**´ **Dunklen Materie**





Q: welt der physik, american museum of natural history, spektrum

*s. Master-VL: ´Einführung in die Kosmologie´

Dunkle Materie, nachgefragt von J. Wess

- **Weshalb sollte $SUSY$ –basierte Dunkle Materie aus Gauginos aufgebaut sein?**

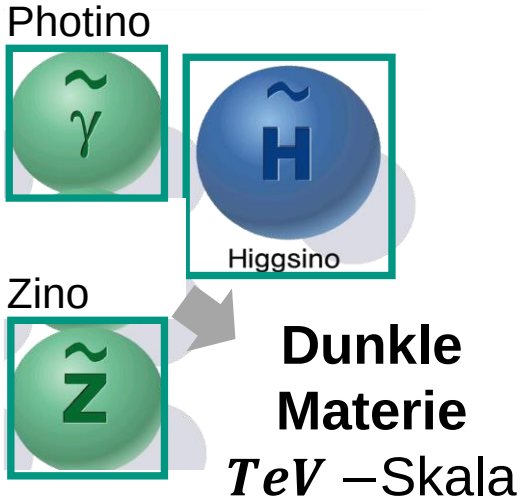
A) Weil $\boldsymbol{Squarks}$ der starken Wechselwirkung unterliegen, und $\boldsymbol{Sleptonen}$ geladen sind… ✓

B) weil $\boldsymbol{Squarks}$ und $\boldsymbol{Sleptonen}$ als $\boldsymbol{Bosonen}$ keine Materiebausteine sein können… ✓

C) weil $\boldsymbol{Gluinos}$ stark wechselwirken… ✓

D) weil $\boldsymbol{Winos}$ geladen sind… ✓

Julius Wess

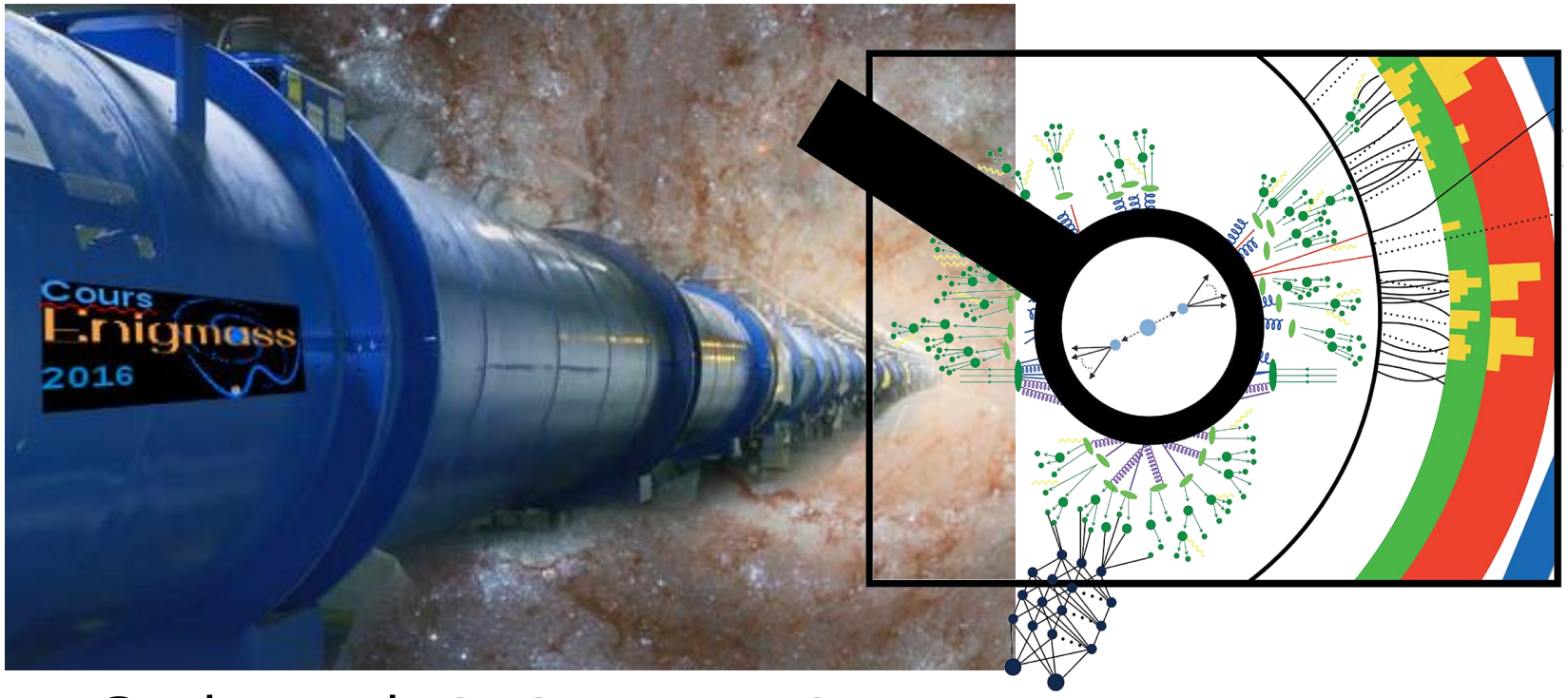


Q: spektrum

Supersymmetrie: experimentelle Tests

- $SUSY$: **Teilchen der kalten Dunkle Materie im Universum werden auf der TeV – Massenskala vermutet**

  - intensive experimentelle Suchen nach supersymmetrischen ´Superpartnern´*



Suche nach $SUSY$ am LHC

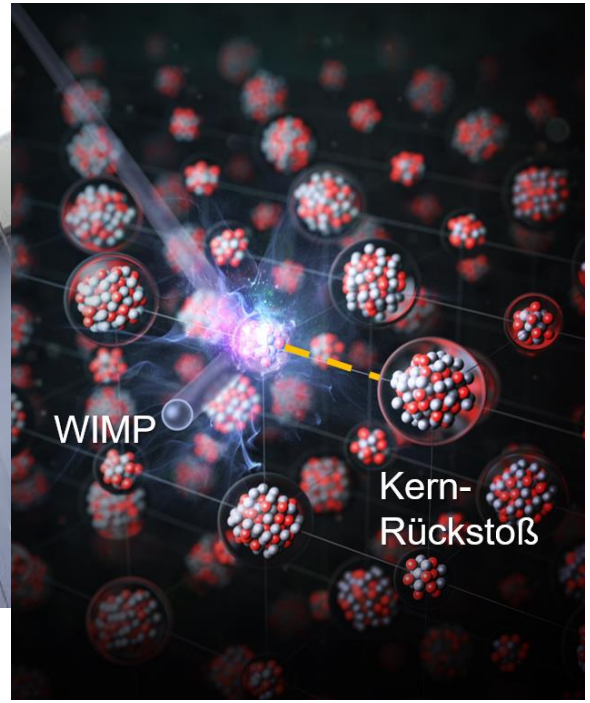
Q: CERN,J. Cham

*s. Master-VL: ´Einführung in die Teilchenphysik´

Supersymmetrie: experimentelle Tests

- $SUSY$: **Teilchen der kalten Dunkle Materie im Universum werden auf der TeV –Massenskala vermutet**

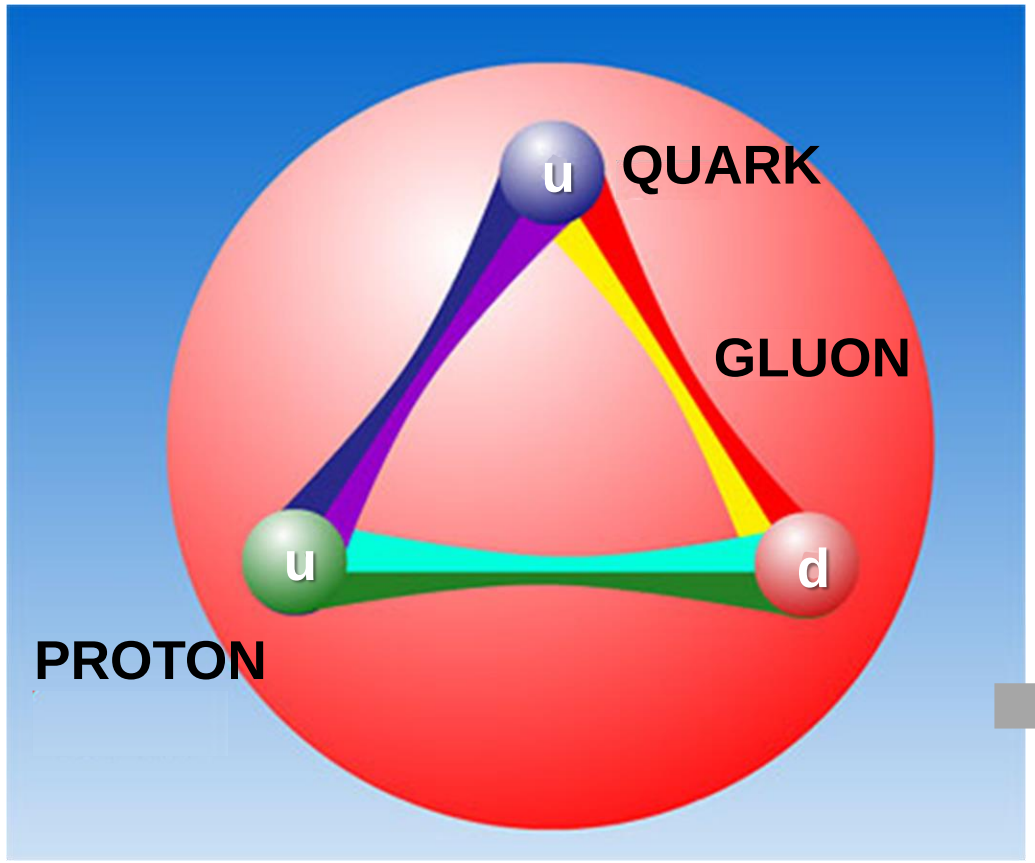
  - intensive experimentelle Suchen nach supersymmetrischen ´Superpartnern´*

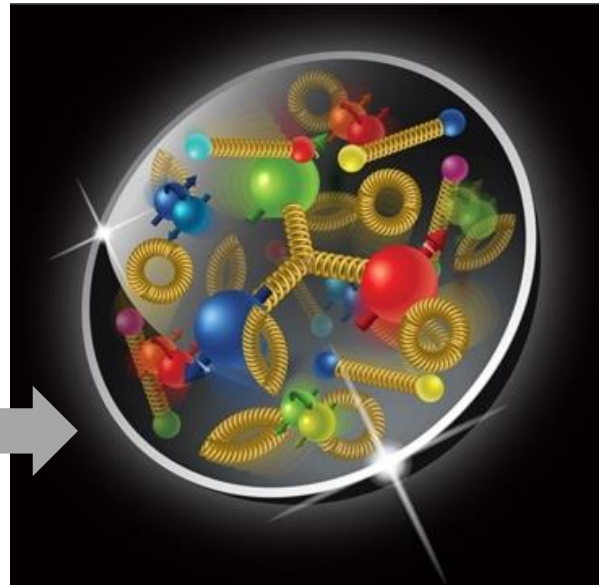


Q: XENON Collab., J. Cham

Dunkle Materie - Suche ($XENON$)

*s. Master-VL: ´Astroteilchenphysik-I´



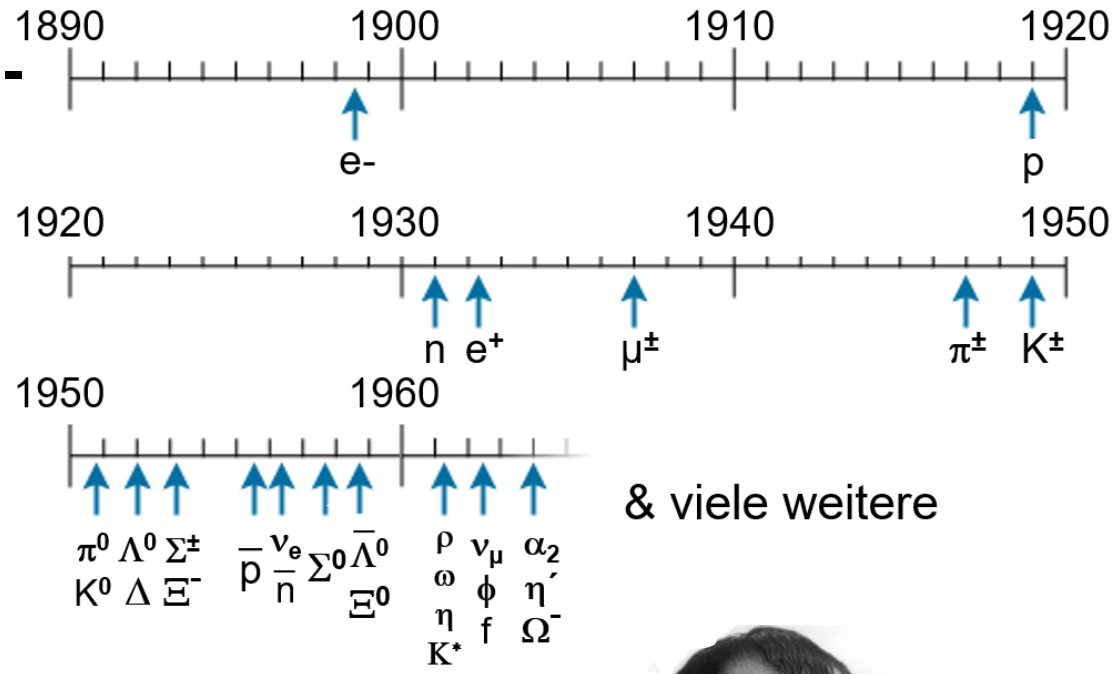


KAPITEL 6: QCD – QUARKS, GLUONEN & HADRONEN

Q: BNL, scinexx.de

Entdeckungsjahre der Teilchenphysik

- **Historie der Teilchen-Entdeckungen**

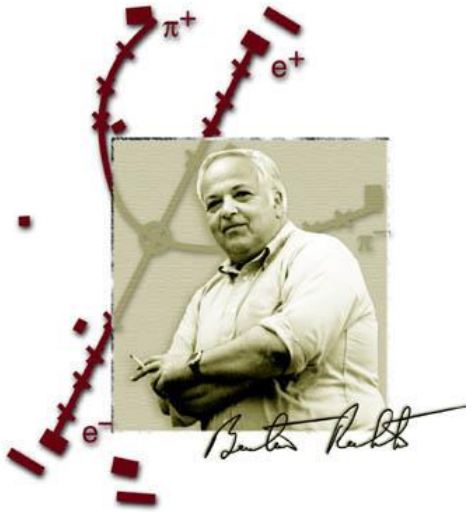


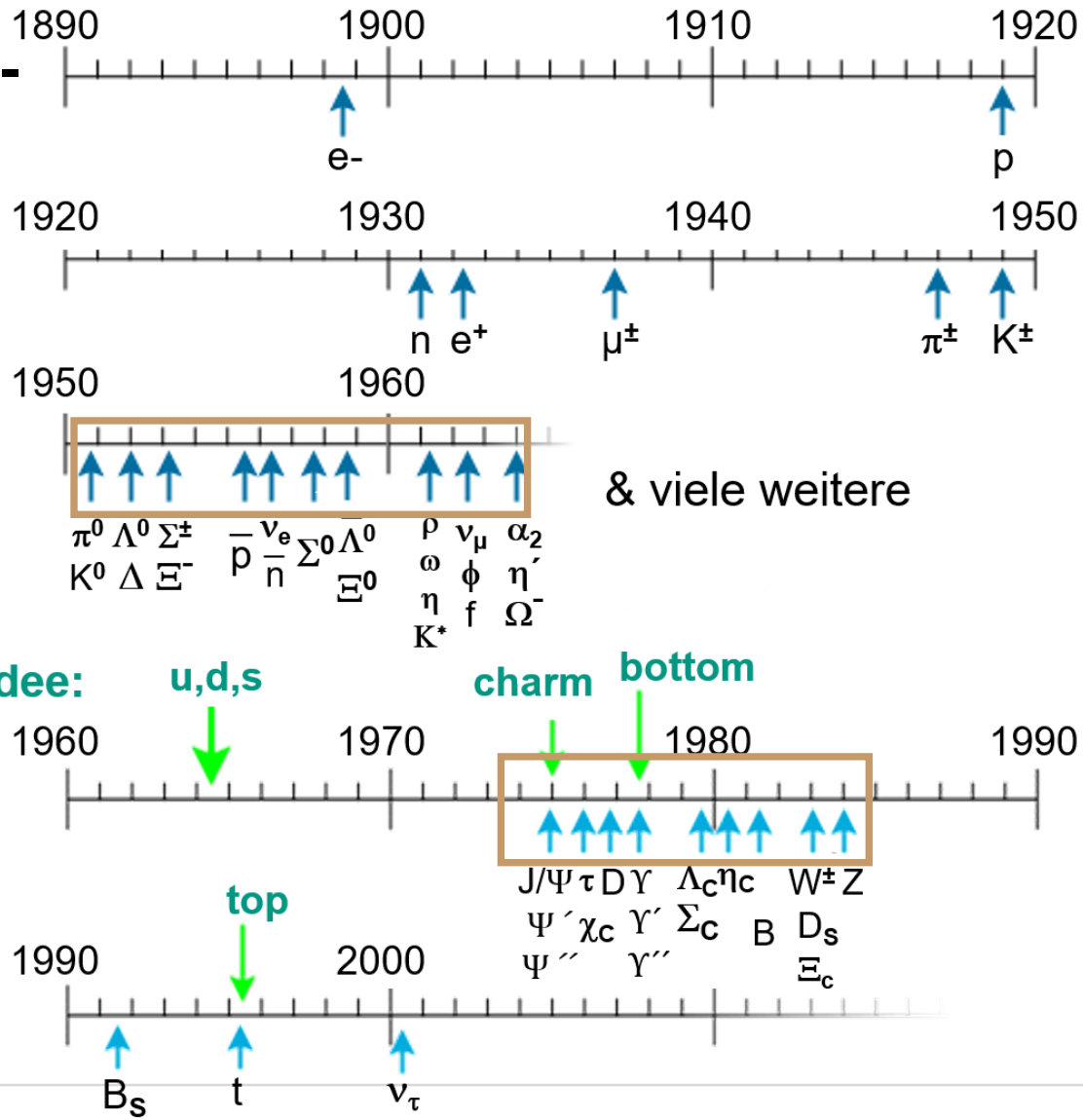
& viele weitere

...had I foreseen this, I would have gone into botany ...

Entdeckungsjahre der Teilchenphysik

- **Historie der Teilchen-Entdeckungen**

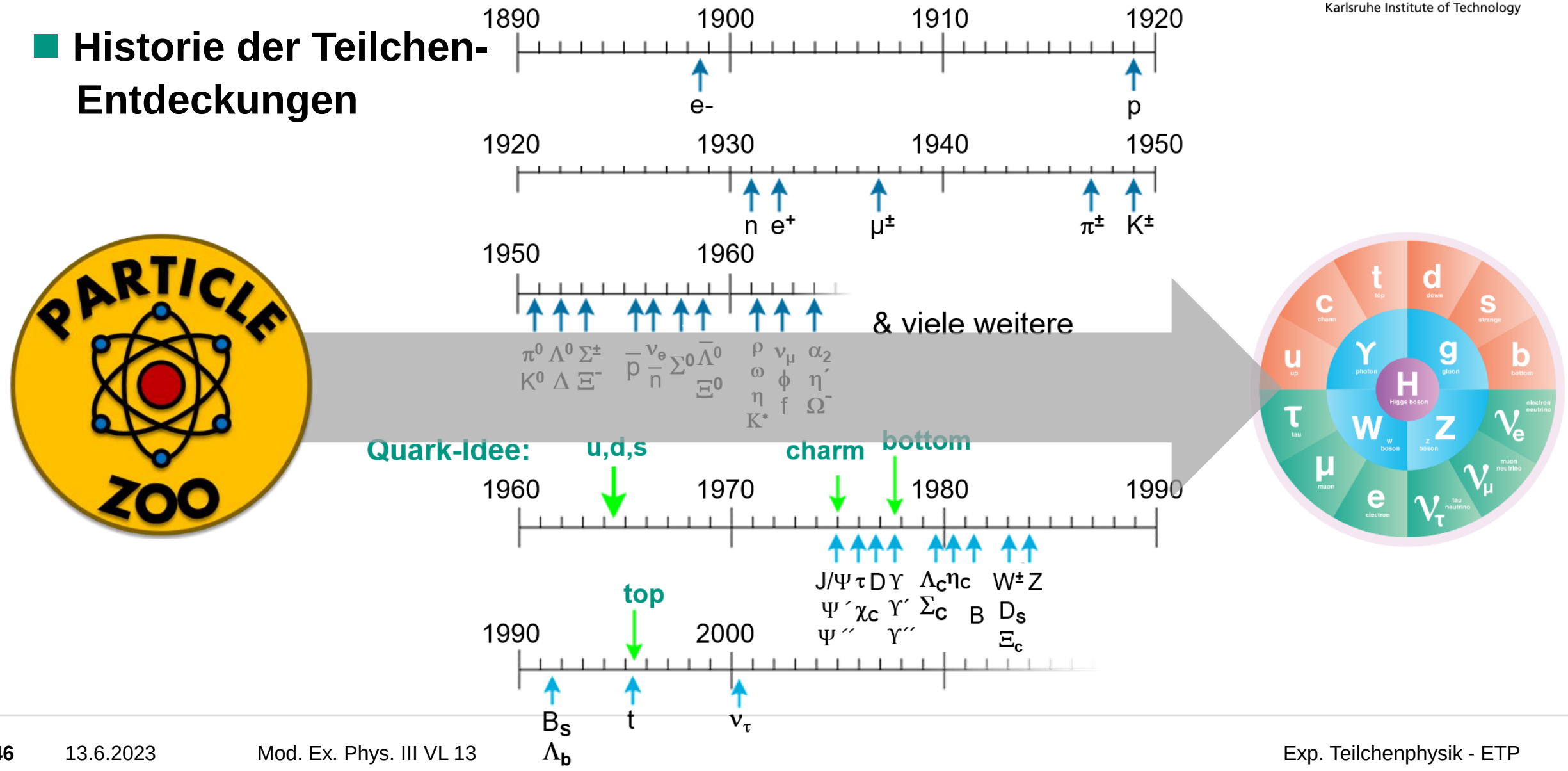


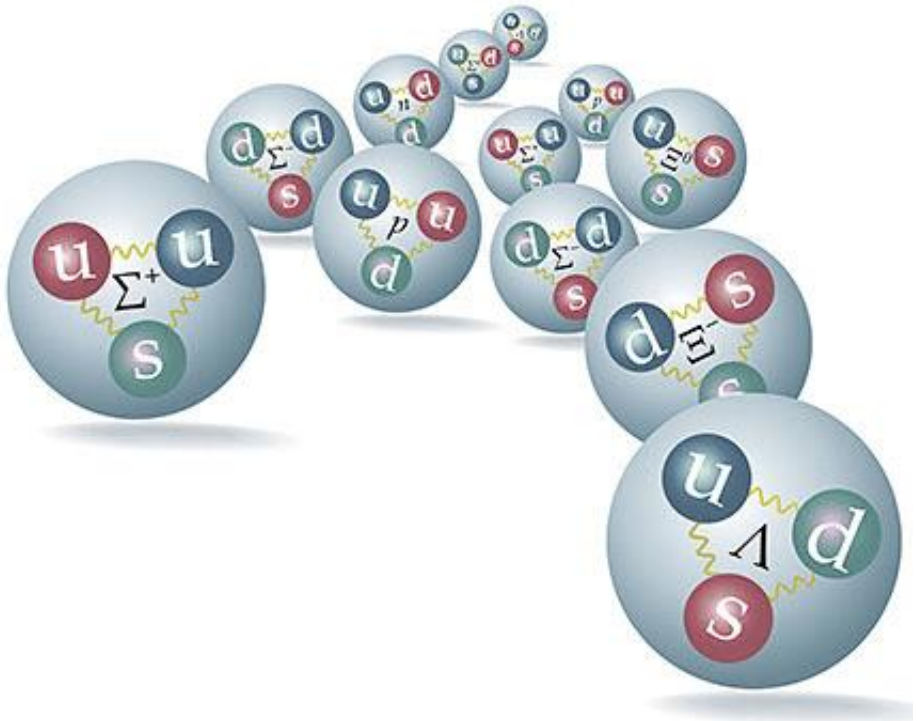


Q: wikicommons, fermilab, bing.com, CERN

Entdeckungsjahre der Teilchenphysik

- **Historie der Teilchen-Entdeckungen**





KAPITEL 6.1: QUARK-MODELL DER HADRONEN

Q: wikipedia, physicstoday

Isospin – Symmetrie

- **Heisenberg:** starke Kernkraft unterscheidet nicht zwischen Protonen & Neutronen
  ⇨ **beide sind Ladungs– / Isospin– Zustände des Nukleons**

Q: wikicommons

- **Ladungsunabhängigkeit** der starken Kernkraft

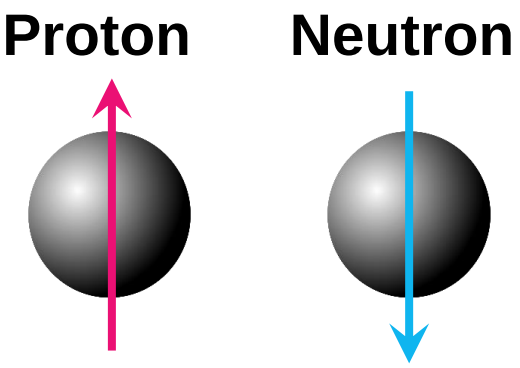
$$\boxed{V_{stark}(p-p) = V_{stark}(p-n) = V_{stark}(n-n)}$$

- fast identische **Massen** der Ladungszustände des Nukleons:

m (Proton) = $938,272\ MeV$

m (Neutron) = $939,565\ MeV$

$\Delta m \sim 0,1\ \%$ durch elektromagnetische Wechselwirkung



Isospin – Symmetrie beim Nukleon

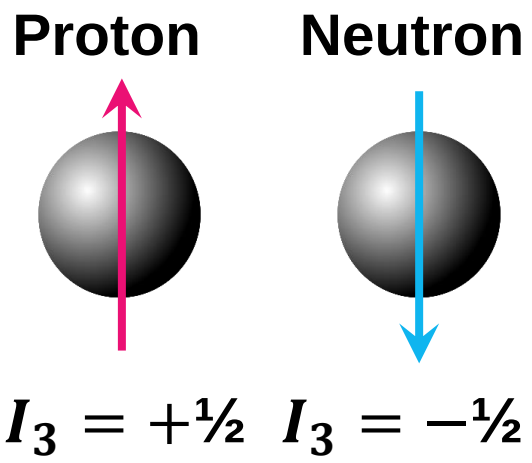
- **Starker Isospin: Dublett-Struktur**

  - **innere Symmetrie** der **starken Wechselwirkung**: **identische starke Kopplung** von **Protonen** und **Neutronen**

  - Proton ($I_3 = +½$) & Neutron ($I_3 = -½$) bilden **Isospin – Dublett ($I = ½$)**

$$I = ½ \qquad I_3$$

$$\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} +½ \\ -½ \end{matrix} \qquad \text{oder} \qquad \begin{matrix} |½, +½\rangle \\ |½, -½\rangle \end{matrix}$$



  - mathematischer Formalismus ähnlich zum Spin
    ⇨ $SU(2)$ Symmetrie

Isospin – Symmetrie bei Quarks

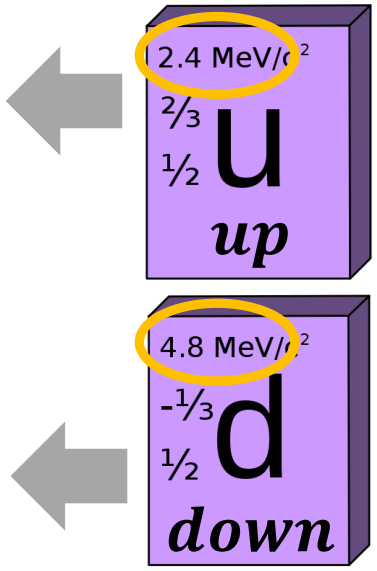
- **Erweiterung auf starken Isospin I von $up-$ und $down-$ Quark**

  - ähnliche Massen von up, $down$ Quarks

  - $up-$ Quark ($I_3 = +½$) & $down-$ Quark ($I_3 = -½$) bilden **Isospin–Dublett ($I = ½$)**

$$I = ½ \qquad I_3$$

$$\begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} +½ \\ -½ \end{matrix} \qquad \text{oder} \qquad \begin{matrix} |\,½\,,\,+½\,\rangle \\ |\,½\,,\,-½\,\rangle \end{matrix}$$



  - alle anderen Quark-Flavours (c, s, t, b) sind **Isospin–Singuletts (starker Isospin)**

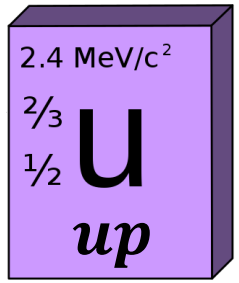
Q:wikimedia

Isospin – Symmetrie bei Quarks

- **Erweiterung auf starken Isospin I von $up-$ und $down-$ Quark**

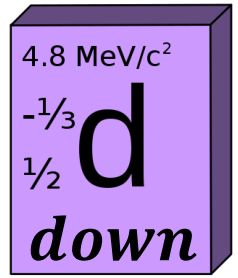
  - $up-$ Quark ($I_3 = +½$) & $down-$ Quark ($I_3 = -½$) bilden **Isospin–Dublett ($I = ½$) für starke Wechselwirkung**

$I_3 = +½$



$$|q\rangle = \begin{pmatrix} |u\rangle \\ |d\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |\, I = ½,\ I_3 = +½\,\rangle \\ |\, I = ½,\ I_3 = -½\,\rangle \end{pmatrix}$$

$I_3 = -½$



  - ´**gedrehte**´ Quarkzustände (erzeugt via **unitäre Matrix U**) ununterscheidbar*

$$|q'\rangle = \begin{pmatrix} |u'\rangle \\ |d'\rangle \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} |\,u\rangle \\ |d\rangle \end{pmatrix} = U\,|q\rangle$$

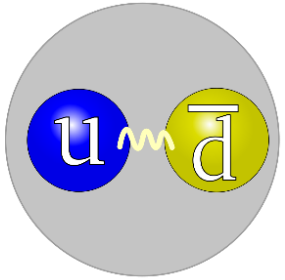
Q:wikimedia

*s. ´unboxing´-Vorlesung

Isospin – Symmetrie bei Pionen

- **Pionen – ein Isospin-Triplett**

  - Pion: gebundener $\boldsymbol{Quark - Antiquark}$ Zustand



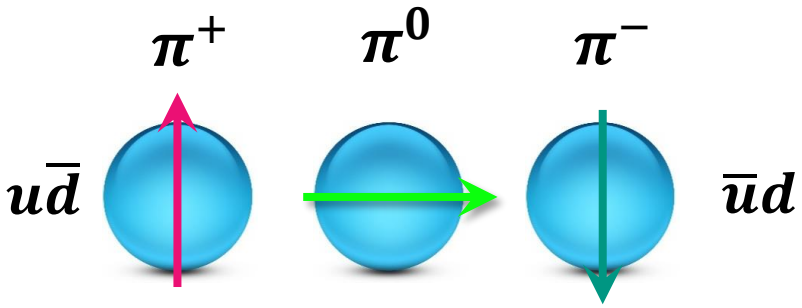
$\boldsymbol{\pi^+}$

  - drei Ladungszustände: ($\boldsymbol{\pi^+}$, $\boldsymbol{\pi^0}$, $\boldsymbol{\pi^-}$)
    mit ähnlichen Massen $\boldsymbol{m(\pi^{\pm}) = 139,57\ MeV}$ und $\boldsymbol{m(\pi^0) = 134,98\ MeV}$

  - **Pionen mit $\boldsymbol{u, d}$ Quarks (Antiquarks) zeigen Isospin – Symmetrie**
    (erstes Beispiel einer **Flavour – Symmetrie** der Quarks)

$\boldsymbol{I = 1}$

Triplett-Zustand



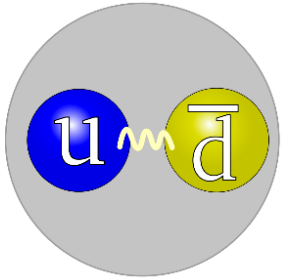
$\boldsymbol{I_3 = +1}$ $\boldsymbol{I_3 = 0}$ $\boldsymbol{I_3 = -1}$

Q: wikicommons

Isospin – Symmetrie bei Pionen

- **Pionen – ein Isospin-Triplett**

  - Pion: gebundener $\boldsymbol{Quark - Antiquark}$ Zustand



$\boldsymbol{\pi^+}$

  - drei Ladungszustände: ($\boldsymbol{\pi^+}$, $\boldsymbol{\pi^0}$, $\boldsymbol{\pi^-}$)
    mit ähnlichen Massen $\boldsymbol{m(\pi^{\pm}) = 139,57\ MeV}$ und $\boldsymbol{m(\pi^0) = 134,98\ MeV}$

  - **Pionen mit $\boldsymbol{u, d}$ Quarks (Antiquarks) zeigen Isospin – Symmetrie**
    (erstes Beispiel einer **Flavour – Symmetrie** der Quarks)

$$|\pi\rangle = \begin{pmatrix} -|u\bar{d}\rangle \\ \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle\right) \\ |\bar{u}d\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} |I = 1, I_3 = +1\rangle \\ |I = 1, I_3 = 0\rangle \\ |I = 1, I_3 = -1\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -|\pi^+\rangle \\ |\pi^0\rangle \\ |\pi^-\rangle \end{pmatrix}$$

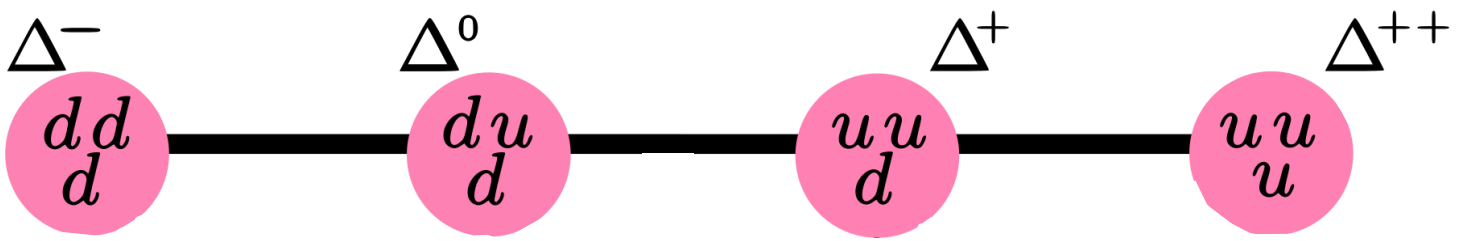
Q: wikicommons

Isospin – Symmetrie: Multiplette

- **Multiplett-Struktur bei Mesonen und Baryonen mit u, d Quarks**

  - **Mesonen** ($q\bar{q}$): **Singuletts** mit $I = 0$ (ω)
    Tripletts mit $I = 1$ (π, ρ)

  - Baryonen (qqq): **Dubletts** mit $I = ½$ (p, n)
    Quadrupletts mit $I = {}^{3}/_{2}$ $(\Delta^{-}, \Delta^{0}, \Delta^{+}, \Delta^{++})$



Q: wikicommons

  - $2I + 1$ Zustände